



AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES ANTT

RECURSO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO -
RDT:
UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE FERRO SILÍCIO-
MANGANÊS COMO AGREGADO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS DOSADAS PELA METODOLOGIA
SUPERPAVE

RELATÓRIO FINAL

Nova Lima/MG, Setembro de 2017

RECURSO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO RDT
UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE FERRO SILÍCIO-MANGANÊS
COMO AGREGADO EM MISTURAS ASFÁLTICAS DOSADAS PELA
METODOLOGIA SUPERPAVE

RESUMO: A área de pavimentação é uma grande consumidora de recursos naturais, o que motiva a busca de alternativas para implantação e/ou recuperação da malha rodoviária do país. Considerando que o Brasil está posicionado entre os maiores produtores do ramo siderúrgico, e que, um dos resíduos de maior volume gerado nestas indústrias são as escórias, o presente relatório visa avaliar a viabilidade técnica do uso de escória de ferro silício-manganês como agregado para misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico. Sendo caracterizados os materiais escória, pedra britada e ligante asfáltico, utilizados como matéria prima dessas misturas. A escória de ferro silício-manganês foi estudada através de ensaios normatizados e por ensaios adicionais como expansibilidade, difração de Raio X, análise química quantitativa, lixiviação e solubilização. Adotando a metodologia de dosagem Superpave, sucedeu os experimentos para a determinação do teor de projeto das misturas betuminosas com diferentes composições de agregados, siderúrgico e convencional, utilizando o CAP 30/45. As misturas foram submetidas a avaliação mecânica por meio dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência e vida de fadiga por compressão diametral a tensão controlada. Os resultados, utilizando o agregado siderúrgico, foram comparados com os obtidos para uma mistura dosada com brita convencional, certificando-se que a composição com teor ótimo de betume atende aos requisitos da norma. As análises dos resultados possibilitaram ponderar se o agregado siderúrgico pode ser, a princípio, utilizado ou não para compor o revestimento asfáltico como uma alternativa técnica viável. Poucas experiências de uso de escória em revestimento asfáltico, empregando a metodologia Superpave, foram realizadas no país, o que motivou o presente estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Comportamento Mecânico, Escória, Mistura Asfáltica, Pavimentos Alternativos, Superpave.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	5
1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Concessionária	5
1.2 Contextualização do tema	7
1.3 Proposta e Justificativa	10
1.4 Objetivos.....	11
1.4.1 Objetivo Geral	11
1.4.2 Objetivos Específicos.....	11
1.5 Estrutura do Relatório	12
CAPÍTULO 2.....	14
2 CONTEXTO BIBLIOGRÁFICO	14
2.1 Ferroligas.....	14
2.1.1 Ferroligas de Manganês	19
2.2 Escória	21
2.2.1 Expansão da escória de ferro silício-manganês	25
2.2.2 Aplicações de escória.....	29
2.2.2.1 Breve histórico da aplicação de escória em pavimentos	31
2.3 Dosagens de misturas asfálticas	35

2.3.1 Dosagem Superpave - Superior Performing Asphalt Pavements.....	37
CAPÍTULO 3	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 Amostragem	44
3.1.1 Ligante asfáltico.....	44
3.1.2 Escória de ferroliga de manganês	44
3.1.3 Agregado Pétreo	47
3.2 Ensaios laboratoriais dos agregados.....	47
3.2.1 Ensaios físicos	48
3.2.2 Ensaios Químicos e Ambientais	58
3.2.3 Ligante Asfáltico.....	66
3.3 Misturas asfálticas a quente	67
3.3.1 Composição granulométrica das misturas asfálticas	67
3.3.2 Temperatura dos Materiais	69
3.3.3 Procedimento Superpave	70
3.3.4 Dosagem das misturas asfálticas	74
3.3.5 Compactação dos corpos de prova.....	75
3.3.6 Cálculo dos parâmetros volumétricos das misturas.....	78
3.4 Ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas.....	85
3.4.1 Resistência à Tração Estática por Compressão Diametral.....	86
3.4.2 Módulo de Resiliência por Compressão Diametral	88

3.4.3 Fadiga por compressão diametral a tensão controlada	91
CAPÍTULO 4	95
4 RESULTADOS	95
4.1 Caracterização dos agregados	95
4.1.1 Ensaios Físicos	95
4.1.2 Ensaios Químicos e Ambientais	99
4.2 Caracterização do Ligante- CAP	104
4.3 Projeto das Misturas Asfálticas.....	105
4.3.1 Misturas de Agregados.....	105
4.3.2 Requisitos volumétricos de mistura utilizando os parâmetros Superpave	108
4.4 Análises Mecânicas.....	116
4.4.1 Módulo de Resiliência	116
4.4.2 Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	119
4.4.3 Fadiga	120
CAPÍTULO 5	124
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
ANEXO I.....	141
ANEXO II.....	143
ANEXO III.....	153

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Concessionária

CONCESSIONÁRIA DA BR-040 S.A.

End.: Rua Niágara, 350 – Jardim Canadá - Nova Lima/MG

A Via040, Figura 1.1, trecho com 936,8 km da rodovia BR-040, entre Brasília/DF e Juiz de Fora/MG, interliga duas importantes regiões do país (Sudeste ao Centro Oeste) e se destaca pela relevância estratégica para o desenvolvimento da economia brasileira. Inúmeras empresas nacionais e estrangeiras instaladas às margens da Via040 ou em cidades próximas vêm investindo pesados aportes na ampliação de suas unidades, com geração de empregos diretos e indiretos.

A rodovia também faz ligação com outros importantes eixos produtores. Ao elevado volume de tráfego de caminhões (transporte de cargas), soma-se a movimentação de ônibus e veículos de passeio resultante de transportes de diferentes naturezas, desde negócios até turismo. É de suma importância para o escoamento da produção e transportes diversos, que as condições funcionais e estruturais dos pavimentos da rodovia garantam a agilidade e segurança do tráfego, com baixos custos operacionais dos veículos. Para tanto, é necessária uma gestão dos dados relativos à pavimentação para compreender os mecanismos que governam o comportamento dos pavimentos e desenvolver técnicas e soluções que retornem em resultados positivos para a sociedade e meio ambiente.

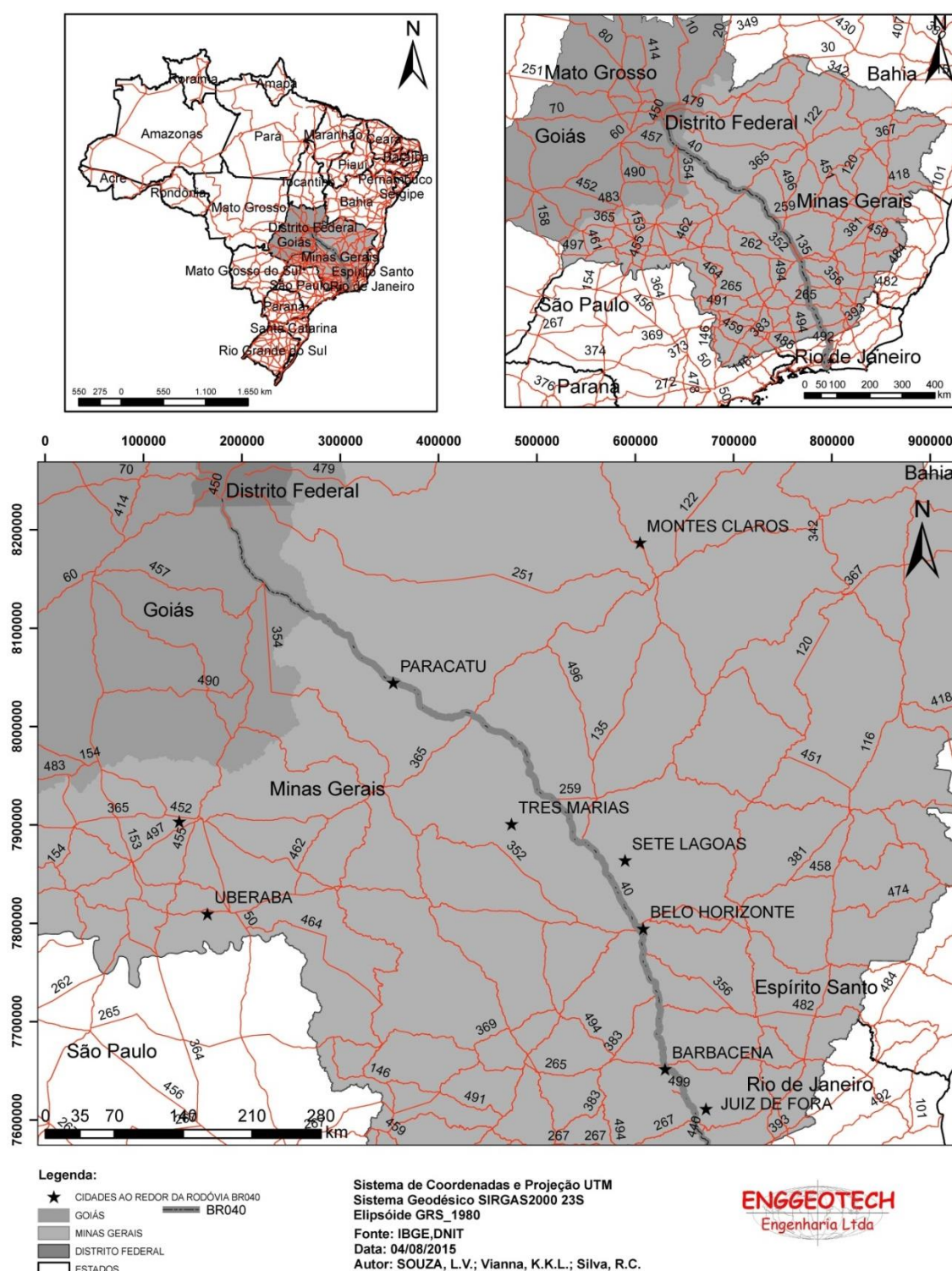


Figura 1.1 - Mapa de localização da Via 040.
 Fonte: Enggotech, 2015.

O projeto de Recurso de Desenvolvimento Tecnológico (RDT) objetiva a compreensão do comportamento e desempenho da escória de Ferro Silício-Manganes para

emprego nos pavimentos da Via040 (Brasília/DF e Juiz de Fora/MG). Por meio de um programa de capacitação técnica, análises de resultados de monitorações e ensaios de campo e laboratoriais, busca-se aprimorar o conhecimento sobre o emprego das escórias na pavimentação.

As rodovias, que interceptam ou não a Via040, implantadas ou planejadas, também serão favorecidas, pois as informações e os resultados das análises desse relatório poderão ser utilizados como referência para elaboração de estudos e projetos. A melhor compreensão do material, em estudo, contribuirá para soluções mais eficazes na aplicação dos recursos disponíveis, de maneira a responder às necessidades das concessionárias, de forma sustentável para preservação e melhoria da qualidade ambiental. Também redundará em retornos positivos para a sociedade e para o meio ambiente, proporcionando melhorias nos processos de consumo de recursos naturais e gestão de rejeitos.

1.2 Contextualização do tema

Historicamente, percebe-se que houve incentivos à implantação e ao desenvolvimento da fabricação em larga escala de eletrointensivos, especialmente alumínio, metais não-ferrosos e ferroligas. Dessa forma, a capacidade de produção teve uma alteração de 500 mil t/ano para 1.130 mil t/ano, no início da década de 90. Neste período, após expressiva expansão do setor, o Brasil ocupava o quarto lugar em produção e o terceiro em exportação, entre os países produtores de ferroligas do mundo ocidental, sendo responsável por cerca de 7% das trocas internacionais do setor.

Atualmente, apesar de existir cerca de 60 países produtores, somente oito são os responsáveis por 80% da produção mundial. Diferenciais competitivos como a abundância de minério e a existência de mão-de-obra competitiva, posicionou o Brasil entre os oito maiores países produtores de ferroligas e silício metálico, apresentando um crescimento de 1,8% entre os anos de 1990 e 2000 (FEAM, 2010). Em 2004, bateu-se recorde de produção de aço bruto, produzindo 32,9 milhões de toneladas, originando também um

recorde na produção de escória, 4,6 milhões de toneladas, uma vez que, em média, cada tonelada de aço gera 140 kg de escória (Silva *et al.*, 1988).

Desta forma, deve-se considerar que o crescimento do setor siderúrgico no Brasil, embora proporcione ganhos econômicos, intensifica impactos negativos ao meio ambiente e à sociedade, visto que esse crescimento, normalmente, está relacionado a um estratégia de inclusão na economia global, tendo por base a exploração de recursos naturais e tecnologias que são poluentes e/ou degradantes.

Um dos resíduos de maior volume gerado nas indústrias siderúrgicas são as escórias que representam 67% de todos os resíduos (Moura, 2000). Esses resíduos industriais têm conquistado uma atenção maior para a reciclagem e para aplicabilidade em outras áreas. Fato atribuído tanto por aspectos econômicos, quanto ambientais. Ressalta-se que a minimização de custos, tendo em vista que não há mais necessidade de grandes áreas de armazenamento, além do valor agregado pelo seu uso, são motivos que valorizam a proposta de reutilização (Fernandes, 2010).

De acordo com John (1996), considera-se como resíduos, todos os rejeitos com origem no processo de produção, independente do seu valor comercial. Do ponto de vista ambiental, a principal intenção é buscar a transformação de um resíduo em um coproduto, tendo em vista que através da reciclagem é possível minimizar o consumo energético na produção de novos produtos. Além de favorecer a dispersão de compostos contaminantes, o que não ocorre quando há deposição dos resíduos, seja em pilhas nos pátios ou em contêineres fechados.

A falta de uma política efetiva de aproveitamento de resíduos no passado tem causado problemas críticos ao setor siderúrgico. As novas legislações ambientais estão mais austeras, impondo as empresas a realizar destinos mais seguros aos seus resíduos. Por isso, o reaproveitamento destes resíduos significa uma solução técnica, econômica e ecológica para as siderúrgicas (Mancio, 2001).

O resíduo de um minério proveniente de determinada planta de processamento mineral exhibe, em geral, características singulares e, em razão disso, processos tecnológicos para utilização de um dado resíduo nem sempre poderão ser efetivos para um

similar. Havendo a carência de pesquisas mais específicas e detalhadas para diferentes plantas (Reis, 2005).

As propriedades físicas e químicas da escória, e do agregado dela resultante, dependem do processo de elaboração das ligas, do grau metalúrgico produzido, e do processamento da própria escória após vazamento. Assim, as propriedades do agregado resultante do tratamento são específicas quanto ao processo e ao forno onde é fabricado a liga. Do ponto de vista tecnológico, os aspectos envolvidos na sua aplicação e que precisam de especial atenção são a granulagem para as escórias de alto-forno e o controle da expansão para as escórias de aciaria, além da granulometria.

De acordo com Della *et al.* (2005), é através do reaproveitamento dos resíduos gerados que há a oportunidade de diminuir a exploração de jazidas escassas de matéria-prima bruta, reduzir a poluição indiscriminada e cooperar no racionamento de energia. As empresas siderúrgicas se deparam com dificuldades em relação ao destino final do grande montante de resíduos produzidos pelo processo de fabricação do aço, em parte pela inexistência de espaço em seus pátios devido aos anos de armazenamento inadequado, ou por falta de um plano de descarte eficaz que objetivasse o reaproveitamento e/ou reciclagem dos resíduos.

Dentre os variados setores da construção civil, a área da pavimentação é uma grande consumidora dos recursos naturais, como os materiais rochosos, que são transformados em brita, originada do desmonte de rocha viva até a granulometria desejada. O atual cenário de limitações destes recursos para melhoria da infraestrutura viária motiva a busca de alternativas para implantação e/ou recuperação da malha rodoviária e ferroviária do país.

Assim, cada vez mais o emprego da escória nas camadas do pavimento pode ser uma alternativa viável, técnica e economicamente. O baixo custo de obtenção do Agregado Siderúrgico viabiliza sua utilização, principalmente próximo às usinas produtoras, além de ser uma alternativa correta ambientalmente para disposição do material do gerador. Até o momento, a maioria das aplicações no Brasil foram em camadas de base e sub-base e em menor grau em misturas asfálticas a quente. Esta pouca experiência de uso de escória em tratamento superficial motivou este presente estudo.

Vale ressaltar que o material, ferro silício-manganês, é utilizado nesta dissertação como um coproduto (agregado siderúrgico) gerado em conjunto com as ferroligas de manganês, e não como um resíduo denominado de escória, usualmente designado pelo setor metalúrgico. Todavia, considerando os termos técnicos utilizados por esse setor, esse estudo referirá ao agregado siderúrgico de ferro silício-manganês como escória.

Neste contexto, esse trabalho enfoca a escória de ferro silício- manganês, produzida por uma siderurgia na região do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, sendo que o estudo desenvolvido visa cercar de respaldos técnicos para a correta utilização desta em misturas asfálticas.

1.3 Proposta e Justificativa

A produção de ferroliga impacta o meio ambiente de forma negativa, gera grandes volumes de resíduo, provoca emissão de gases tóxicos, além da emissão de resíduos líquidos. Um dos resíduos sólidos gerados é a escória, este estudo tem como parceria uma empresa do setor de mineração do Brasil, a Vale S/A, junto a concessionária Via040, e se enquadra no escopo do Programa de Pós-Graduação do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), e propõe avaliar a viabilidade técnica da utilização desse material de descarte, como agregado para misturas asfálticas, do tipo concreto asfáltico.

O uso do material trará benefícios ambientais para a indústria siderúrgica, já que minimiza as agressões ao meio ambiente, e possivelmente trará um custo menor na execução das camadas do pavimento em regiões próximas à oferta de escória.

Com o acréscimo contínuo da demanda por matérias primas naturais para a construção civil, caracterizada pelo crescimento populacional, e por consequência a geração de um enorme volume de resíduos, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas no intuito de minimizar a extração de recursos naturais e maximizar o uso de resíduos. A construção de estradas tem um potencial alto para o consumo de rejeitos, já que, conforme

menção Valverde (2003), na pavimentação em apenas 1 km de via de 10 metros de largura são empregados entre 2.000 t. a 3.250 t. de agregados.

A indústria siderúrgica vem crescendo e gerando cada vez mais resíduos. O Estado de Minas Gerais possui grandes grupos que geram escória, essas empresas se concentram, em sua maioria, próximas ao quadrilátero ferrífero. E portanto, devido ao baixo DMT (Distância Média de Transpote) deste agregado em relação às rodovias interestaduais e intermunicipais, o mesmo se torna atrativo em caso de viabilidade do uso em camadas de revestimento do pavimento.

Aliada a preocupação do que fazer com o resíduo siderúrgico, há a necessidade de utilização desses resíduos em virtude da pressão ambiental e escassez dos recursos naturais, ressaltando que não há estudos muito específicos para cada tipo de escória, pelas prefeituras, órgãos estaduais e federais do estado mineiro. Por estas razões, o estudo nesta região torna-se adequado em termos econômicos, técnicos e ambientais.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica do uso de escória de ferroliga como agregado graúdo e miúdo para misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico.

1.4.2 Objetivos Específicos

Compreende os objetivos específicos dessa pesquisa as seguintes ações:

- Revisão bibliográfica do assunto, de forma a conhecer os estudos com a utilização de escória de manganês em misturas asfálticas e a dosagem dessas misturas pelo método SUPERPAVE;
- Oficialização de parceria com empresa da região para fornecimento do material que será estudado;
- Expansão do laboratório do RDT, com a realização de adequação da infraestrutura e aquisição de equipamentos essenciais para o desenvolvimento do projeto;
- Caracterizar a escória de ferro silício-manganês através de ensaios normatizados e por ensaios adicionais como expansibilidade, difração de Raio X, análise química quantitativa, lixiviação e solubilização;
- Realizar as misturas asfálticas hipotéticas, pela dosagem Superpave, e posterior verificação de seu comportamento perante os parâmetros de aceitação das normas vigentes;
- Avaliar mecanicamente as misturas asfálticas tipo concreto asfáltico confeccionadas com escória de ferroliga, por meio dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência e Vida de Fadiga;
- Estudar a viabilidade técnica desse material, o que beneficiará a sociedade de forma geral, financeira e ambientalmente.

1.5 Estrutura do Relatório

O presente relatório foi estruturado em cinco capítulos, conforme é descrito abaixo:

- Capítulo 1: sendo este capítulo de introdução ao tema. Contendo a proposta, justificativa e os objetivos dessa pesquisa.

- Capítulo 2: através de uma revisão bibliográfica, foi elaborado um levantamento sobre a siderurgia e a escória. Do mesmo modo, foi feita uma abordagem sobre a pavimentação asfáltica, mencionando características do pavimento que serão avaliadas na parte experimental. Tratar-se-á, também, sobre misturas asfálticas e sua caracterização mecânica, sobretudo, da metodologia Superpave.
- Capítulo 3: aborda a obtenção dos materiais utilizados neste estudo (ligante asfáltico, escória e agregado convencional) e o método utilizado para caracterização física, química, ambiental e mecânica desses materiais. Serão apresentadas as metodologias adotadas para cada ensaio.
- Capítulo 4: apresenta os resultados da caracterização dos materiais empregados na pesquisa, assim como da dosagem Superpave das misturas investigadas e traz a caracterização mecânica realizada através dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR) e vida de fadiga por compressão diametral a tensão controlada. Apresentando a análise e discussão desses resultados obtidos experimentalmente.
- Capítulo 5: expõe as conclusões e considerações obtidas com o estudo e sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

2 CONTEXTO BIBLIOGRÁFICO

2.1 Ferroligas

As ferroligas são ligas concentradas de ferro e um ou mais metais, tais como silício, manganês, magnésio, nióbio e cálcio, e tem por finalidade propiciar aos metais determinadas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas ou anticorrosivas. Já o silício metálico refere-se a um semi-metal e embora não seja uma liga, é comumente classificado no grupo de ferroligas, por ter processo industrial e aplicações similares (FEAM, 2010).

A categoria ferroligas posiciona-se entre duas importantes atividades econômicas: a mineração e a siderurgia. Sendo essas, insumos essenciais na indústria siderúrgica, afinal são indispensáveis na fabricação de todos os tipos de aço, cerca de 85 % da produção destinada ao setor siderúrgico e o restante para os demais setores como o químico, o farmacêutico, etc (Andrade; Cunha; Gandra, 1999).

As propriedades mecânicas dos aços ligados são bem melhores do que aquelas dos aços ao carbono. A combinação de diversos elementos de liga produz aços e ligas com uma larga faixa de propriedades (Lúcio *et al.*, 1980).

A divisão dessas é realizada pelo tipo de substâncias empregadas na produção da liga, sendo que as mais produzidas mundialmente são as Ligas de manganês, correspondendo a 39 %; as Ligas de silício (incluindo silício metálico) correspondem a 27 %; as Ligas de cromo, com 26 %; e as Ligas de níquel, com 5 %.

De modo geral, na produção de ferroligas uma tecnologia largamente usada é a do forno elétrico de abertura superior a arco submerso. Nesse processo o aquecimento se dá por uma corrente que passa por eletrodos de grafite suspensos a uma cuba de aço recoberta de refratários, no formato de xícara. A redução de carbono dos óxidos metálicos

ocorre quando são consumidos tanto o coque ou carvão vegetal, quanto os eletrodos de grafite. Durante a fusão das ferroligas, a reação de redução sucede em alta temperatura. O carbono captura o oxigênio dos óxidos metálicos para formar CO_2 , enquanto que os minerais são reduzidos a metais básicos derretidos, por conseguinte, os metais presentes combinam-se na solução.

Segundo mencionam Andrade, Cunha e Gandra (1999) mais de 85% da produção mundial de ferroligas são consumidos pelo setor siderúrgico, sendo o restante destinado às indústrias metalúrgica, à química e à eletrônica. No cenário atual, ainda que existam cerca de 60 países produtores, somente oito são os responsáveis por 80% da produção mundial, estando o Brasil entre os maiores países produtores de ferroligas e silício metálico, devido a diferenciais competitivos como a abundância de minério, redutores (carvão vegetal) e a existência de mão-de obra competitiva.

A empresa pioneira na produção de ferroligas em escala industrial, no Brasil, foi a Companhia Níquel do Brasil, em 1935. Impulsionada pelo desenvolvimento siderúrgico brasileiro, a indústria de ferroligas vivenciou um grande avanço na década de 70, quando a produção saltou de 127 mil t em 1972, para 552 mil t, no ano de 1980. No final dos anos 80, a indústria nacional de ferroligas, passou por um forte desaquecimento diminuindo em aproximadamente 1/4 sua produção e em 1/3 seu nível de exportações. No começo da década de 90, o Brasil ocupava o quarto lugar em produção e o terceiro em exportação entre os países produtores de ferroligas do mundo ocidental, e era responsável por quase 7% das trocas internacionais do setor, conforme dados da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2010).

Ressalta-se que o setor brasileiro apresentou um crescimento de 1,8%, entre os anos de 1990 e 2000, já no ano de 2011, a produção brasileira de ferroligas foi em torno de 854 mil t, sofrendo uma diminuição, em torno de 8%, em relação ao ano anterior (MME, 2012). A Figura 2.1 retrata a produção de ferroligas de 2007 a 2011.



Figura 2.1 - Gráfico da produção de ferroligas no Brasil.
Fonte: MME, 2012.

Conforme a Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM (2010) menciona, o Estado de Minas Gerais é, hoje, o maior produtor de ferroligas e silício metálico do Brasil, totalizando vinte e duas empresas. O setor conta com sessenta e seis fornos, possuindo capacidade instalada de 68.914t/mês, sendo que cinco desses fornos produzem atualmente liga de cálcio-silício. Essas indústrias produtoras de ferroligas e silício metálico estão distribuídas por todo o Estado, conforme ilustra a Figura 2.2 da FEAM (2010).

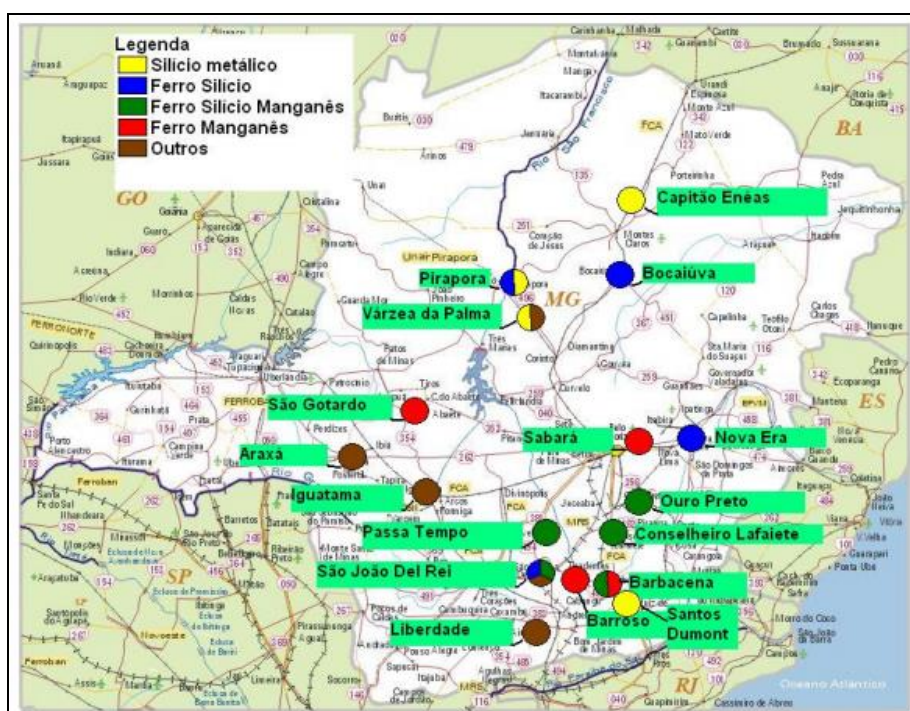


Figura 2.2 - Distribuição geográfica dos empreendimentos do setor de ferroligas e silício metálico em Minas Gerais.
Fonte: GEMOG/FEAM, 2010.

A alta concentração de unidades em Minas Gerais decorre da inclinação do estado que, com as suas grandes reservas de minério de ferro, estimulou a implantação de usinas siderúrgicas, que são os principais consumidores das ferroligas. Além da existência de grandes reservas de manganês e quartzo, que alavancou a implantação de unidades produtoras dos dois tipos de liga predominantes (Kruger, 2009).

A FEAM, no ano de 2010, procedeu um diagnóstico do setor de produção de ferroligas no Estado de Minas Gerais, em que se observa a capacidade mensal instalada do setor de ferroligas, em toneladas e por tipo de liga, conforme expresso no gráfico da Figura 2.3. Sendo a maior capacidade instalada, a do setor de ferro-silício, seguida pelos setores de silício metálico e ferro-nióbio.

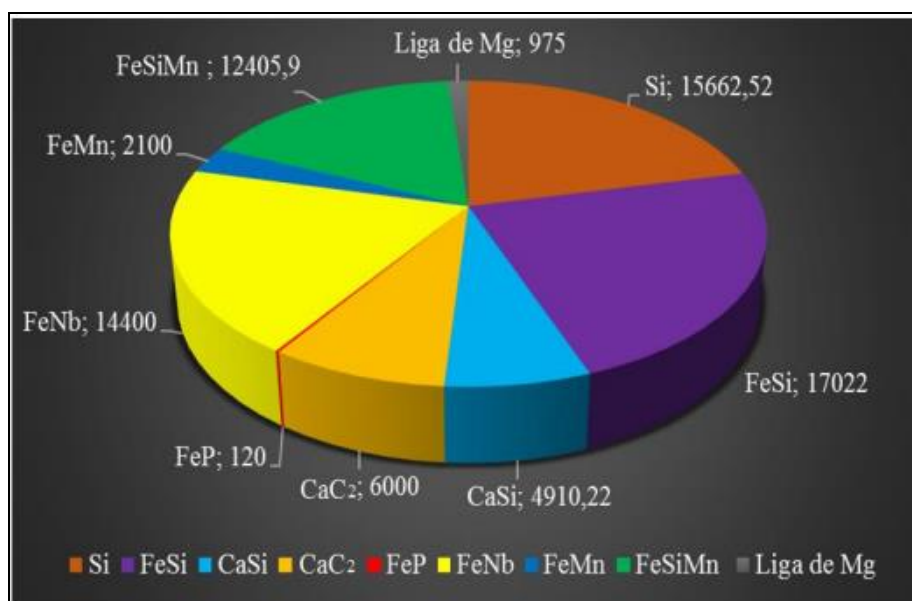
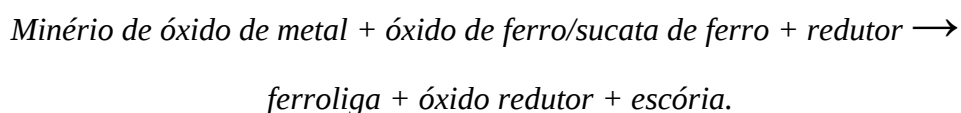


Figura 2.3 - Capacidade mensal instalada (t/mês) do setor de ferroligas.
Fonte: FEAM, 2010.

De acordo com a matéria-prima que é empregada, a fabricação de ferroligas pode ser realizada a partir de um processo primário ou secundário. As principais reações químicas destes processos podem ser expressas como:

- Processos primários:



- Processos secundários:



O processo produtivo das ferroligas, com o objetivo de homogeneidade química do produto final, requer uma rígida classificação química e granulométrica das matérias-primas utilizadas. Basicamente as ferroligas mais convencionais são ferro-silício, ferro-cromo, ferro silíciomanganês e ferro-manganês, que estão presentes em quase todos os processos de produção de ferro e aço comum ou especial (Leite; Bajay; Gorla, 2010).

As ferroligas deste estudo são produzidas, principalmente, pelo processo de redução. Segundo informações fornecidas pela Vale S.A. esse processo, conforme Anexo I, ocorre da seguinte maneira, as matérias-primas consistem em minérios de manganês, fundentes e agentes redutores que convenientemente equilibrados e misturados no forno elétrico (reator metalúrgico), promovem o processo químico de redução, cujos produtos são as ligas de manganês, além dos resíduos do processo: escória e materiais particulados retidos em filtros de mangas. Os principais minérios de manganês empregados são provenientes das minas de Azul em Carajás, mina de Urucum em Corumbá e mina de Morro da Mina em Conselheiro Lafaiete.

Os chamados fundentes são quartzo e calcário/dolomita cujas funções são o ajuste químico da carga mineral e o controle da viscosidade e temperatura da escória. Os redutores, consistem em coque metalúrgico de diferentes origens e coque de petróleo, sendo que, estes são os responsáveis por promoverem as reações químicas com o minério e fundentes para a obtenção da liga metálica final.

Considerando as plantas de Minas Gerais, em estudo, emprega-se também, escórias de FeMnAC (ferro manganês alto carbono) e FeMnMC (ferro manganês médio carbono) como fonte de Mn devido ao elevado teor daquele metal. Utilizando ainda,

minério de ferro, quando necessário, para ajuste químico final da liga.

Os minérios, fundentes e redutores são misturados compondo o que se qualifica como “blend” e são acrescentados no forno elétrico. Em adição, o forno recebe energia na forma de energia elétrica que, se converte em energia térmica para aquecimento da carga e obtenção da temperatura ideal das ocorrências das reações químicas de redução. Outro insumo também importante é a pasta eletródica que, em associação com grandes tubos metálicos, formam o eletrodo Soderberg. A função do eletrodo é a transmissão da energia elétrica para a carga mineral e, por efeito Joule, aquela energia se transforma em energia térmica.

A liga é “lingotada” em estruturas qualificadas como “broas”, em Minas Gerais ou “piscina”, na Bahia. Após resfriadas, são destinadas ao processo unitário de britagem. Esse processo permite a obtenção de diferentes faixas granulométricas para o atendimento aos diferentes clientes.

2.1.1 Ferroligas de Manganês

Uma das grandes relevâncias na indústria de ferroligas mundial é o manganês. Em torno de 90 % de todo manganês gerado no mundo está na forma de ferroligas de manganês, sendo que pelo menos 98% são consumidas pela indústria do aço. As ligas de manganês são, portanto, os tipos mais produzidos mundialmente, e, devido à sua propriedade dessulfurante e desoxidante, são aplicadas na fabricação de praticamente todo tipo de aço e ferro fundido. No processo de produção são adicionados aproximadamente 10 kg de liga por tonelada de aço (Olsen; Tangstad; Lindstad, 2007).

A maioria dos minérios de manganês do mundo é encontrada no estado tetravalente, como óxidos ou hidróxidos (Gonçalves e Serfaty, 1976). Esse minério é a matéria-prima para a produção das ligas de ferro silíciomanganês (FeSiMn) e o ferro-manganês (FeMn) (Andrade e Cunha, 2002).

Segundo Kruger (2009), as ligas e ferroligas de manganês são classificadas pela

quantidade de carbono e silício adicionados em sua produção. Há as ligas com alto teor de carbono e as com médios e baixos teores. São, respectivamente:

- Ferro-manganês alto carbono (FeMnAC);
- Ferro-manganês médio carbono (FeMnMC);
- Ferro-manganês baixo carbono (FeMnBC);
- Ferro silício-manganês (FeSiMn).

A Ferro silício-manganês corresponde às ligas que, além do manganês, apresenta quantidades importantes de silício em sua composição. A Tabela 2.1 apresenta os elementos das ferroligas de manganês.

Tabela 2.1 - Características das ferroligas de manganês.

Elementos das Ligas	Ferro- manganês alto carbono (FeMnAC)	Ferro- manganês médio carbono (FeMnMC)	Ferro- manganês baixo carbono (FeMnBC)	Ferro silício- manganês (FeSiMn)
Manganês – Mn (%)	74 a 78	80	80	80
Carbono – C (% máx.)	7	0,5	3	3
Silício – Si (% máx.)	1	2,5	2	12 a 20
Fósforo – P (% máx.)	0,38	0,3	0,3	0,2
Enxofre – S (% máx.)	0,03	0,03	0,03	0,03
Ferro – Fe (%)	Balanço	Balanço	Balanço	Balanço

Fonte: Kruger, 2009.

E, a Figura 2.4 ilustra a estrutura da indústria produtora de ferroligas de manganês.

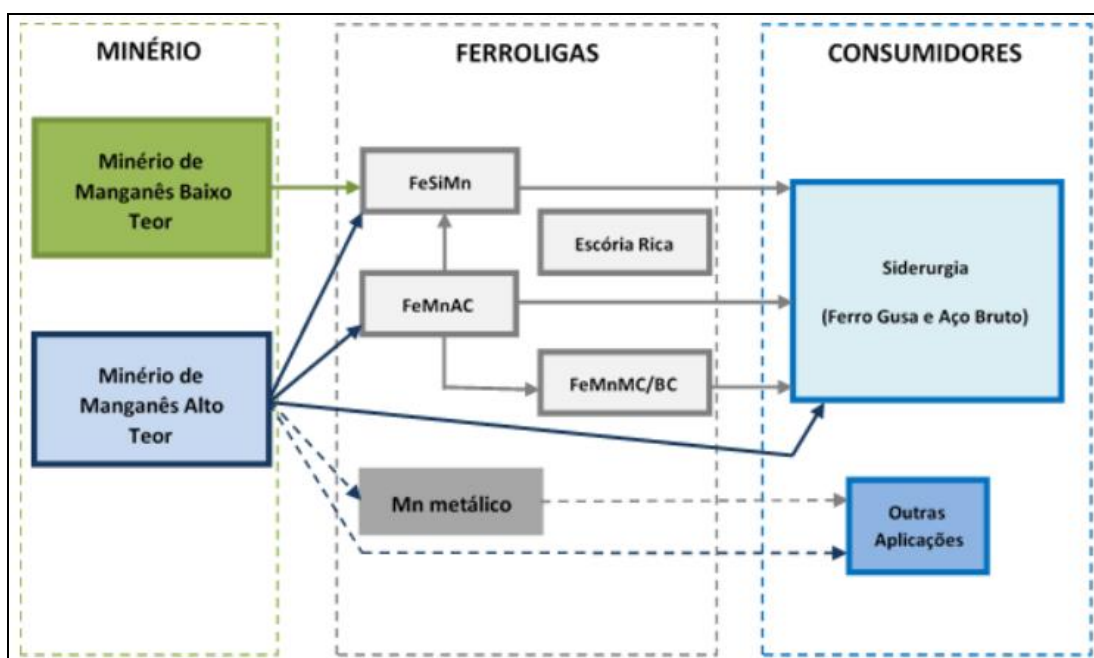


Figura 2.4 - Estrutura da produção de manganês.

Fonte: Nóbrega *et al.*, 2007.

Na produção do ferro silico-manganês (FeSiMn) pode-se empregar o método a partir de minério de manganês e quartzo, com redução simultânea do manganês e silício, ou aquele a partir de minério de manganês silicoso, escória rica de FeMnAC, escória de FeSi (ferro silício com 75 % de silício) e quartzo (Faria, 2008).

2.2 Escória

De acordo com Silva *et al.* (1988), as escórias siderúrgicas, são originadas de processos industriais dos quais se obtém, primeiramente, o gusa, ferro de primeira fusão, e em segundo lugar, o aço. Fatores como processo, matéria-prima empregada, tipo de forno utilizado e resfriamento do rejeito, interferem na composição química de uma determinada escória, alterando suas características físicas, químicas e mineralógicas (Castelo Branco, 2004).

Há dois tipos de escórias siderúrgicas que são mais conhecidas, a de alto-forno e a de aciaria. Sendo as escórias de alto-forno, oriundas da fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro gusa. Sua formação dá-se pela combinação de impurezas contidas nos

minerais do minério de ferro, com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e, ainda, com as cinzas do coque ou carvão vegetal. Quando fundida, a escória de alto-forno, permite que haja duas fases bem distintas, o que possibilita uma separação por escoamento em níveis distintos entre a escória e o gusa (Alvarenga, 2001; Castelo Branco, 2004).

Já as escórias de aciaria, são formadas durante a produção do aço, e tem sua formação pela etapa de refino, no qual se controla a percentagem de carbono e elimina-se o excesso de impurezas que possam afetar a qualidade do aço (Silva *et al.*, 1988). A geração de escórias se distinguem conforme o emprego de diferentes fornos de refino, sendo eles: conversor a oxigênio LD (Linz-Donawitz) ou BOF (*Blast Oxygen Furnace*) no qual se utiliza o conversor a oxigênio elétrico ou EAF (*Electric Arc Furnace*) que emprega o forno de arco elétrico, este permite regular as escórias, para que apresentem propriedades redutoras e oxidantes separadamente. E o OH (*Open Heart*) que utiliza o forno *SiemensMartin*, sendo que esse último não está mais em operação no Brasil (Machado, 2000; Castelo Branco, 2004).

Há também uma classificação das escórias de aciaria em oxidante, que é obtida da oxidação do carbono, silício e fósforo através da injeção de oxigênio no aço fundido, ou redutora, sendo esta formada na dessulfuração do aço líquido e adição de elementos de liga pelo acréscimo de óxido de cálcio (CaO) e de fluorita (CaF₂). As escórias oxidantes são formadas pelos processos LD, EAF e OH, e as escórias redutoras são obtidas somente pelo EAF (Machado, 2000).

O tipo de resfriamento que a escória líquida é submetida interfere em sua formação. Com um processo de resfriamento lento, os seus constituintes vão formando diferentes fases cristalinas, perdendo parcialmente seu poder de aglomerantes hidráulicos. No entanto, se o resfriamento ocorrer rapidamente seu potencial hidráulico, propriedade de endurecer-se quando em contato com a água, é mantido, pois a escória granula, “vitrificando-se” (Silva *et al.*, 1988).

A escória atua como um filtro que retém as impurezas do processo de produção das ligas. Todo tipo de ferroliga a ser produzida irá gerar uma escória que apresentará uma composição, viscosidade e basicidade específicas. De acordo com Tangstad (1996) e

Olsen, Tangstad e Lindstad (2007) o controle da basicidade das escórias é primordial para a liga, aumentando a produtividade. Entretanto, em alguns casos, ao invés de produzir a escória pobre que evita a perda de produto a ser incorporado à liga, a exemplo do manganês, é adotado práticas de reciclagem e reaproveitamento de escória rica para que haja a recuperação do manganês.

No caso da escória de ferro silício-manganês, objeto de estudo deste relatório, há dois tipos de escória formadas pelos processos de produção das ferroligas referidas, a escória rica, que é ácida e contém altos teores de Mn (superior a 40%), sendo reciclável e reaproveitada como insumo na produção de FeSiMn. E a escória pobre, que é básica e possui baixo teor de manganês ($\text{MnO} < 20\%$) e cerca de 30% Si, é produzida através da adição de resíduos de silício da indústria de ferro silício e, ao final do processo de produção da ferroliga, é descartada (Olsen; Tangstad, 2004). Por apresentar elevados teores de Mn, ela possui um aspecto vítreo, que acarreta em perda de sua resistência e a torna arriscada para o manuseio.

O agente principal que afeta o processo de recuperação do manganês é o óxido de manganês na escória fundida, que é determinado pela composição da escória. Óxidos básicos exercem um papel preponderante na melhoria do comportamento de escória, dessa forma, os óxidos CaO e MgO aumentam a atividade do MnO, mas minimiza a atividade de SiO_2 , que é indispensável para produzir FeSiMn (Nikolaev, 1974).

O termo basicidade da escória é estabelecido para avaliar a função e as propriedades da mesma, sendo que as definições da basicidade da escória, depende das práticas e valores dos constituintes. Diversos autores analisaram os efeitos da basicidade (B1-basicidade binária e B2- basicidade ternária) e deram diferente valores para a produção do SiMn, como pode ser observado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores de basicidades de SiMn.

Autores	Basicidade binária – B1	Basicidade ternária – B2:
Gobdullin <i>et al.</i> (1982)	33 - 48	-
Emlin <i>et al.</i> (1986)	60 - 75	-
Chaichenko <i>et al.</i> (1986)	-	0,65 - 0,9

Fonte: Oliveira, 2013.

Para a avaliação correta da basicidade da escória, quanto as ligas com auto teor de Si, a magnitude da basicidade da escória é feita a partir da razão B3, expressa na Equação 2.1, pois o B3 está afetando mais a recuperação do manganês e silício que o B1 ou B2, devido à redução de SiO₂ em processo de fundição (Nikolaev, 1974).

$$B3 = \frac{(CaO.MgO)}{Al_2O_3} \quad (2.1)$$

Nikolaev (1974) descobriu que um valor ótimo para B3 é 2,5, já Emlin *et al.* (1986) apontam que um valor ótimo para B3 está na faixa de 1,2 - 2,2.

As principais características do Agregado siderúrgico típico foram elencadas por Ramos (2008):

- Elevada resistência mecânica, textura rugosa e morfologia de alta cubicidade, favorecendo maior atrito;
- Estrutura física de elevada densidade e porosidade acentuada;
- Coloração predominante cinza clara;
- Elevada resistência a variações climáticas e abrasão, menor desgaste e maior permeabilidade;
- Alta estabilidade e durabilidade para todas as aplicações;
- Inexistência de material orgânico, inibidor natural para a vegetação;
- Intertravamento produzindo superfície estável, pelo formato cúbico;
- Alto peso específico, proporcionando elevada resistência a movimentos laterais;
- Geração contínua de grandes volumes garantindo o fornecimento do material.

Não há especificação para o uso de escória de ferroliga, mas conforme um trabalho de Silva *et al.* (1988), a escória de ferroliga para uso em pavimentação deve atender aos seguintes limites:

- Isenta de impurezas orgânicas, contaminação com solos e outros materiais;

- Absorção de água: 1,0 a 2,0% em peso;
- Massa específica: 3,0 a 3,5 g/cm³ ;
- Massa unitária: 1,4 a 1,6 kg/dm³ ;
- Desgaste por abrasão Los Angeles: no máximo igual a 35,0% para sub-base, base e revestimento;
- Durabilidade ao sulfato de sódio: 0,0 a 5,0%, em 5 ciclos.

2.2.1 Expansão da escória de ferro silício-manganês

A utilização das escórias em obras de infraestruturas e superestruturas rodoviárias e ferroviárias, exige cuidados, pelo fato de as escórias, em geral, possuírem características expansivas ocasionadas, principalmente, pela hidratação de cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) e à corrosão e oxidação do ferro metálico residual, produzindo tensões internas que originam trincas e até acarretam na fragmentação do material, ou seja, numa expansão destrutiva (Alexandre; Raguin, 1984; Ângulo; Zordan; John, 2001; Fernandes, 2010; Geiseler *et al.*, 1999; Gumiere, 2000; Machado, 2000; Motz e Geiseler, 1998; Sahay; Nagpal; Prasad, 2000).

Alguns autores mencionam que o acréscimo do conteúdo da cal (Ca(OH)₂) nas escórias é diretamente relacionado com o aumento da expansibilidade das mesmas, assim como o aumento da temperatura e da quantidade de espécies no estado livre (Rohde, 2002).

O óxido de cálcio total se encontra em teores que variam de 39% a 50% nas escórias de aciaria e alto forno, por isso se torna o maior responsável por sua expansibilidade, especialmente a baixas idades. Esse potencial de expansão na escória de aciaria pode também ser vinculado à sua basicidade, pois escórias mais ácidas tendem a ser menos expansivas (Machado, 2000). Essa expansão pode chegar a 10,0%, causando erupções na pista, que podem atingir até 10 cm de altura (Silva e Mendonça, 2001).

A Figura 2.5 ilustra pavimentos com emprego escória não curada.



(a) Erupções na pista.

(b) Pavimento trincado.

Figura 2.5 - Pavimento com utilização de escória não curada.

Fonte: Silva, 2002.

A identificação desses defeitos nas pistas pode ser prevista através da observação do desenvolvimento de trincas radiais de tamanho reduzido e do estufamento do revestimento. A formação de defeitos no pavimento ocasionados pela expansão pode ocorrer tanto quando a escória é empregada em base e/ou sub-base, ou como agregado em revestimentos asfálticos. Neste segundo caso, embora a princípio o ligante impermeabiliza os grãos da escória, com o desgaste, acontece o contato entre a escória e a água gerando reações de hidratação e, consequentemente, a expansão do material (Kandhal e Hoffman, 1998; Silva, 2002).

Uma maneira de minimizar estes efeitos danosos ocasionados pela cal é aproveitá-la com o menor tamanho de grão possível para que a mesma sofra completa dissolução. A hidratação dos CaO e MgO livres é a principal responsável pela expansão da escória a curto e longo prazos, respectivamente (Kandhal e Hoffman, 1998). Silva *et al.* (1988) concluíram, após 15 anos de pesquisa, que a cinética da reação de hidratação do MgO é muito lenta. O grau de instabilidade destes compostos depende do tamanho dos cristais. Os cristais pequenos hidratam-se rapidamente, enquanto cristais grandes são formados por um processo de resfriamento lento.

Os problemas oriundos da expansibilidade das escórias também podem ser evitados através de um tratamento que proporcione a estabilização dos óxidos expansivos mediante um período de estabilização química, ou cura, dessas escórias na forma sólida,

ou por meio de tratamento de escórias líquidas, alterando-se o processo de resfriamento aplicado nas escórias, ou ainda, adicionando-se agentes redutores e estabilizantes, visando à estabilização e a melhoria das propriedades das escórias a serem empregadas. A cura compreende o fim das reações de hidratação e carbonatação das substâncias expansivas por meio da exposição da escória ao intemperismo (Fernandes, 2010).

Nóbrega (2007), ao empregar a escória de ferro silício-manganês em obras de infraestruturas rodoviárias, executou, durante 14 dias, o ensaio de expansibilidade na escória, a uma temperatura constante de 71 °C. A escória permaneceu 7 dias completamente submersa em água e 7 dias saturada, em concordância com o método PTM 130/78- Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria, adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DERMG).

Para a realização deste ensaio, Nóbrega (2007), compactou a amostra de escória de ferro silício-manganês, adotando os procedimentos da norma DNER ME 049/1994, para a obtenção da umidade ótima de compactação. O resultado é ilustrado no gráfico das curvas da expansão, Figura 2.6 e também na Tabela 2.3.

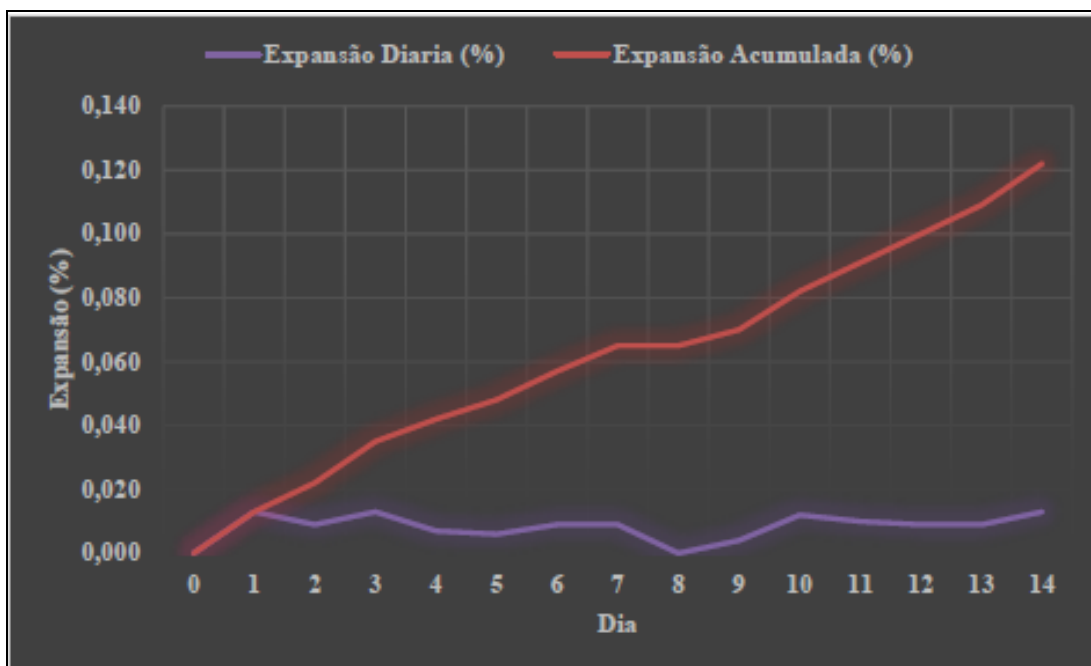


Figura 2.6 - Curvas da expansão diária e da expansão acumulada da escória.

Fonte: Nóbrega, 2007.

Tabela 2.3 - Resultados do ensaio de expansibilidade.

Condição	Dia	Expansão Diária(%)	Expansão Acumulada(%)
Submersa	0	0,000	0,000
	1	0,013	0,013
	2	0,009	0,022
	3	0,013	0,035
	4	0,007	0,042
	5	0,006	0,048
	6	0,009	0,057
Saturada	7	0,009	0,065
	8	0,000	0,065
	9	0,004	0,070
	10	0,012	0,082
	11	0,010	0,091
	12	0,009	0,100
	13	0,009	0,109
	14	0,013	0,122

Fonte: Nóbrega, 2007.

Após os 14 dias de ensaio, obteve-se uma expansão acumulada de 0,12%. Consoante a norma DNER - ME 262/1994, esse valor é inferior ao limite máximo especificado, que é de 3%, e ao valor da norma americana ASTM D 4792/2000, que é de 0,5 %, concluindo-se que esse tipo de escória não é expansivo devido à hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio.

Esse ensaio tem o intuito de verificar a presença de quantidades excessivas de óxidos de cálcio e magnésio livres no material, através do processo de hidratação por meio da aceleração das reações, pela alta temperatura e pelas condições de umidade a que o material é submetido (Nóbrega, 2007). A escória de ferro silício-manganês apresenta vantagens em relação às de aciaria e alto forno, considerando que não há a necessidade de passar por cura e seu teor de cal livre é inferior a 1%.

2.2.2 Aplicações de escória

Em 1982, na Europa foram geradas cerca de, 9×10^6 toneladas de escória, alertando para o fato de que este material deveria ser reutilizado para outros fins, além do uso como matéria-prima para a indústria de fertilizantes (Machado, 2000).

Segundo referencias de 1988, aproximadamente 60,0% das escórias, ficavam estocados enquanto o restante é empregado na construção de bases e sub-bases de rodovias ou em lastros ferroviários (IBS, 1998). A Figura 2.7 mostra um cenário, mais atual, da destinação dada ao resíduo siderúrgico. Nota-se que 20% do resíduo ainda é estocado (IBS, 2004).

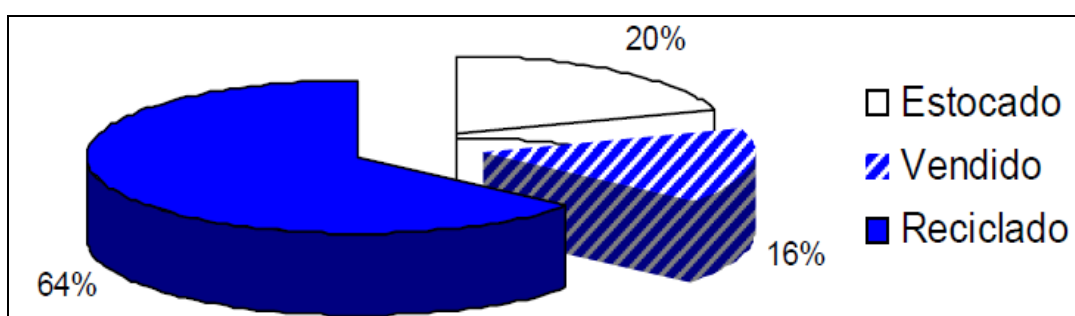


Figura 2.7 - Percentagem da destinação do resíduo siderúrgico.

Fonte: IBS, 2004.

A escória possui várias aplicações comerciais, no entanto, recentes pesquisas estão sendo desenvolvidas com o objetivo de encontrar novos mercados para esse resíduo, buscando uma melhor valorização para o seu reaproveitamento. Depois que ela é reprocessada para separar quaisquer metais que possa conter, os subprodutos deste processo podem ser usados para diversos fins, podendo ser:

- Matéria-prima para produção de cimento, devido à presença dos silicatos dicálcico e tricálcico (2CaO-SiO_2 e 3CaO-SiO_2) que tornam o material com composição química muito parecida com o clínquer formado na produção do cimento *Portland*. Em um estudo, Geyer (2001), considerou viável a utilização de 10,0% da escória de refino redutor como adição ao cimento para produção de concreto.

- Execução de lastros no leito de ferrovias, por possuir alta massa específica. Mas, ressalta-se que é necessário garantir a baixa condutividade deste rejeito para garantir a não formação de fagulhas no caso de transporte de cargas inflamáveis.
- Matéria-prima na indústria de vidro e vitro-cerâmica, com destaque as escórias de alto forno, após tratamento térmico, como substitutas ao feldspato por causa do seu alto teor de sílica e óxidos metálicos.
- Agregado na produção de concreto, por sua alta resistência à compressão e durabilidade à abrasão. Masuero *et al.* (2000) avaliaram a adição de 20,0% de escória de aciaria elétrica em concreto, obtendo valores superiores nas propriedades mecânicas do concreto com adição deste rejeito em comparação ao concreto sem adição.
- Estabilização de solos, por apresentar maior rugosidade superficial, excelente índice de forma, maior angulosidade, maior resistência ao desgaste e o aumento da resistência dos solos (Machado, 2000), mas deve-se considerar que esta utilização tem uma limitação, devido ao alto potencial expansivo deste rejeito.
- Dentro das próprias siderúrgicas, incorporando novamente ao processo como fundente, ou como protetor do revestimento refratário dos fornos, em substituição a cal e ao calcáreo (Rohde, 2002).
- Material para utilização na infra e superestruturas rodoviárias, e também em forma de cascalho em vias não pavimentadas para evitar a formação de poeira. Sua aplicação vai desde a base e sub-base de pavimentos até como agregado na confecção de misturas asfálticas.

Dentre outros fins, tais como: produção de fertilizantes agrícolas termofosfatados; aditivo no cultivo de plantas e algas; execução de aterros; construção de peças de quebramar; contenção sendo utilizada na fabricação de gabiões, controle na drenagem de ácidos etc.

Brun; Yuan (1994) *apud* Geyer (2001) relatam as diferentes origens das escórias com diversas aplicações, podendo ser visualizada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Campo de aplicação das escórias de diferentes origens.

Campo de Aplicação	Procedência da Escória		
	Aciairia	Alto-Forno	Ferro-liga
Ferroviário	X		
Rodoviário	X	X	X
Construção Civil	X	X	X
Agricultura	X	X	X
Fábrica de Cimento	X	X	
Metalúrgico	X	X	

Fonte: Brun; Yuan (1994) *apud* Geyer (2001).

Outra interferência no seu potencial de utilização é em relação ao tipo de resfriamento da escória. As escórias que são resfriadas ao ar são empregadas, sobretudo, como agregados para construção de estradas e em lastros de ferrovias. Já as escórias que são resfriadas bruscamente (granuladas) são normalmente aproveitadas como agregado em concreto, aterro, fabricação de tijolos, adições em concreto de cimento Portland, vidros, granito sintético, concreto leve e matéria-prima para produção do cimento (Geyer, 2001).

2.2.2.1 Breve histórico da aplicação de escória em pavimentos

O uso de escória em pavimentação não é recente, esse material vem sendo empregado no Japão, Estados Unidos, Alemanha, Inglaterra e Canadá. No Japão, a primeira experiência foi datada em 1919, em que se utilizou escória de alto-forno resfriada ao ar na construção para a construção de rodovias para as represas Yofukuji e Kawachi junto à Siderúrgica de Yawata. Na atualidade, o Japão aproveita em larga escala as escórias siderúrgicas no setor rodoviário, sendo empregadas em revestimentos, base, sub-base, estabilização do subleito e outras aplicações (Silva et al., 1988).

Na França, a primeira experiência datada por volta de 1958, deu início à estudos sobre as escórias de alto-forno. Os primeiros trechos experimentais foram feitos em Lorraine e a primeira obra significativa foi na rodovia nacional Saone et Loire. Vale ressaltar que a França possui o *Centre Technique et De Promotion Dês Laitiers De Haut Fourneau*, tendo desenvolvido em profundidade os estudos nessa área (Silva et al., 1988).

No Brasil, este aproveitamento teve origem em 1978, no estado de Minas Gerais, no acesso São Domingos do Prata à BR-262/MG, com a execução de 9 km de base utilizando escória de aciaria bruta, proveniente da siderúrgica Belgo Mineira, forno Siemens Martin. Como não houve um período de cura, não se alcançou um comportamento satisfatório, devido à expansão ocasionada pela hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio livres, característicos desse tipo de escória. Já no trecho da BR-381 – Rio Piracicaba, foi empregada escória de alto-forno, oriunda da Siderúrgica Belgo Mineira, como material de revestimento em Tratamento Superficial Duplo (TSD) com 10 km de extensão. O comportamento foi satisfatório, visto que esse tipo de escória, alto-forno, não apresenta características expansivas (Silva *et al.*, 1988).

Países como Grã-Bretanha, Alemanha, Polônia, França, Japão, Estados Unidos e Rússia utilizam escória de aciaria, sozinha ou combinada, como agregado em revestimentos asfálticos.

Noureldin e McDaniel (1989), analisaram a utilização de escória de aciaria em diferentes porcentagens (87,0%; 73,0% 59,0% e 40,0%) em misturas asfálticas para pavimentos com alto volume de tráfego. Como resultado obtiveram que as misturas com utilização deste rejeito apresentaram alta estabilidade Marshall, até 1.273 Kg, e resistência à tração da ordem de 1,1 MPa. Os autores também avaliaram em campo e verificaram uma boa condição de superfície e resistência à derrapagem. Foi recomendado então, que a expansibilidade da escória fosse combatida com a utilização de um maior teor de cimento asfáltico apesar da redução de estabilidade que esta atitude produz. O alto teor de ferro e Fe_2O_3 neste material provocou um endurecimento da mistura asfáltica e cresceu o trincamento quando a mesma foi aproveitada em baixas temperaturas, tendo como sugestão o uso de cimentos asfálticos menos viscosos. Também recomendaram o uso de misturas asfálticas mais “abertas” e a substituição dos finos da escória por finos de agregados naturais para diminuir o alto peso específico do material.

Silva (1991), notou a potencialidade de uso de escória de aciaria estabilizada granulometricamente com e sem mistura com argila, em distintas proporções, em bases e sub-bases de pavimentos e em misturas usinadas a frio que empregaram escória, areia e emulsão asfáltica. Estas misturas asfálticas foram confeccionadas com 80,0% e 100,0%

deste rejeito nas faixas C do DER-SP e B da Ipiranga, respectivamente. O autor, por fim, sugeriu determinadas seções tipo, a depender da capacidade de suporte do subleito, para pavimentos construídos com a utilização deste rejeito.

Coomarasamy e Walzak (1995), averiguaram a falência precoce de alguns pavimentos, em Ontário-Canadá, que aproveitaram a escória de aciaria. A análise química e morfológica de diferentes escórias foi feita através de microscópios de varredura eletrônica e difração de raio-X. Foram confeccionadas misturas asfálticas com utilização de escórias de forno elétrico e de conversor de oxigênio. Tendo como resultado que o CaCO_3 foi o principal responsável pelo insucesso dos pavimentos investigados, isso porque a presença deste composto gerou uma “colagem” das interfaces do rejeito criando a expansão do material e o consequente trincamento do pavimento.

Kandhal e Hoffman (1998), recomendaram o uso da parcela fina (passando na peneira de 4,8 mm) curada deste material para a produção de misturas asfálticas a quente. Fizeram, além disso, uma correlação entre a expansão das parcelas fina e grossa (retida na peneira de 4,8 mm) indicando o uso da parcela fina curada deste material.

Bagampadde *et al.* (1999), pesquisaram oito tipos de misturas utilizando escória de aciaria. As misturas utilizaram este rejeito em diferentes proporções e de diferentes formas, tanto como agregado graúdo como miúdo. Constataram que misturas com a parcela grossa da escória, agregados calcários e CAP modificado com polímero confirmaram maior vida de fadiga (carga dinâmica, tempo de ciclo 0,1s) e maior resistência à deformação permanente (*creep* dinâmico). As misturas com o uso de cal e polímero ofereceram maior resistência à umidade (maior Módulo de Resiliência - MR depois de condicionadas em contato com água a 60°C durante 35 minutos e após 24 horas). As misturas que adotaram CAP modificado com polímero ainda apresentaram menor susceptibilidade térmica. A mistura que utilizou apenas escória de aciaria como agregado não se mostrou adequada para ser utilizada no local da pesquisa, visto que a mesma apresentou a maior deformação permanente (*creep* dinâmico) e faliu prematuramente não podendo ser ensaiada para tensões acima de 689,5 kPa. Os autores atribuem este fato ao caráter muito áspero dos grãos da escória, que ocasiona maiores tensões cisalhantes nas misturas.

Hunt e Boyle (2000), utilizaram a escória de aciaria em misturas asfálticas usinadas a quente (faixa B do Departamento de Transportes de Oregon). Para a concretização deste estudo um pavimento foi construído, com utilização de 30,0% deste rejeito como agregado na mistura do revestimento, e avaliado durante cinco anos. O desempenho do pavimento foi avaliado como satisfatório já que, neste período, não apresentou trincamento ou diminuição da resistência à derrapagem. A mistura com utilização de escória de aciaria elétrica apresentou maior estabilidade devido à textura rugosa e ao formato angular dos grãos que conferem um melhor intertravamento.

Lima *et al.* (2000) confrontaram dois pavimentos, sendo um com Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e outro com Tratamento Superficial Duplo (TSD), construídos com utilização de escória de aciaria nas camadas de base e sub-base com um terceiro que utilizou Brita Graduada Simples (BGS) e Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) nestas mesmas camadas. As avaliações estruturais se deram através de retroanálise dos MRs *in situ* de todas as camadas do pavimento e do subleito, utilizando o programa RETRAN5-L. Os autores concluíram que pavimentos delgados construídos com a utilização de escória de aciaria são análogos aos espessos executados com agregados convencionais. Os módulos retroanalizados das camadas executadas com escória de aciaria mostraram-se de 3 a 4 vezes superiores ao da camada com BGS. Apesar da grande diferença entre as capacidades estruturais, feita por análise visual e levantamento deflectométrico, dos dois tipos de pavimento (o convencional tinha aproximadamente o dobro da capacidade estrutural do pavimento com TSD e camada de base e sub-base com escória de aciaria), as deflexões máximas mostraram-se apenas 37,0% superiores para o pavimento com escória. O pavimento experimental ofereceu ainda melhor distribuição de carga por apresentar maiores raios de curvatura.

Alvarenga (2001), comparou as propriedades resilientes e o custo de pavimentos que utilizaram escória de aciaria e agregado convencional (brita) em suas bases. O autor determinou os MRs destes materiais e utilizou o programa FEPAVE2 para dimensionar estes pavimentos. Concluiu que este rejeito pode ser usado como material de base porque o mesmo possui comportamento tensão *versus* deformação pouco dependente da umidade e da energia de compactação, além de ter um custo bastante inferior ao da brita.

Parente *et al.* (2003), compararam o uso de solo e escória de aciaria, para a construção de bases e sub-bases, através do comportamento mecânico, ensaios triaxiais cíclicos e ISC, de duas misturas (utilizando 70,0% e 50,0% de escória), com misturas de solo-brita com a mesma granulometria (faixa D do DNER). As misturas ensaiadas proporcionaram maiores valores de massa específica seca máxima e menores valores de umidade ótima, quando comparadas às misturas de solo-brita. Quanto aos valores de ISC, as misturas em teste apresentaram ISC três vezes superiores aos das misturas solo-brita e duas vezes superiores ao do solo puro. Completaram, além disso, que os valores de MR, para qualquer nível de tensão, para as misturas solo-escória foram superiores aos das misturas solo-brita e solo puro.

Dentre as obras brasileiras onde foi empregada a escória na pavimentação, tem-se a BR-393 (Volta Redonda-Três Rios), RJ-157 (Barra Mansa- Divisa RJ/SP), RJ-141 (BR-393-Vargem Alegre), BR-116 (Volta Redonda-Divisa RJ/SP), 13 km da rodovia que liga Volta Redonda e o distrito Nossa Senhora do Amparo (Barra Mansa), várias ruas dos municípios de Volta Redonda, Resende, Barra do Piraí, Itaguaí, Barra Mansa e Magé (RJ) e no município de Mogi das Cruzes (SP), vias no interior da CST e revestimentos primários na região Sul Fluminense (Alvarenga, 2001).

2.3 Dosagens de misturas asfálticas

As misturas asfálticas são empregadas nas construções de rodovias e aeródromos desde o século 20, época em que o asfalto manufaturado tornou-se mais disponível. Desse modo, com um maior emprego desse material na preparação de misturas asfálticas, crescem os interesses e as preocupações dos engenheiros no desenvolvimento de metodologias de dosagem e especificações, de forma a idealizar estas estruturas a menores custos (Senço, 1997).

Ao dosar uma mistura asfáltica determina-se proporções de agregados e ligante, que quando misturadas atendam aos requisitos estabelecidos pelas especificações, proporcionando ao revestimento um comportamento mecânico que resista às solicitações

de carregamento impostas pelo tráfego. Nesse sentido, procedimentos foram criados em todo o mundo para dosagem de misturas asfálticas, onde, cada um apresenta critérios próprios estabelecidos das relações entre os resultados de ensaios de laboratórios e os obtidos em campo (Wesseling, 2005).

O procedimento pioneiro na dosagem de misturas asfálticas é conhecido como método *Hubbard-Field*. Esse método foi, inicialmente, desenvolvido para dosagem de misturas de areia-asfalto, sendo posteriormente modificado para aplicação em misturas com agregados graúdos (*Asphalt Institute*, 1965 *apud* Roberts *et al.*, 2002).

Existem diversos métodos de dosagem, em que cada um admite critérios com o objetivo de estabelecer relações entre ensaios de laboratório e os resultados obtidos no campo, destacam-se (Motta, 2000; Vasconcelos, 2004; Bernucci *et al.*, 2008): o Método Hveem, no qual se analisa parâmetros volumétricos e de resistência de amostras confeccionadas por compactação pulsante; o Método *Marshall*, que emprega a compactação por impacto e determina o teor ótimo de ligante baseado em propriedades volumétricas e medidas de Estabilidade e Fluência; e Método Superpave, que estima o teor de projeto com base no volume de vazios e no conhecimento da granulometria dos agregados, com utilização de um compactador giratório Superpave (SGC), para a confecção dos corpos-de-prova. No Brasil utiliza-se, predominantemente, o método *Marshall*, enquanto o método Superpave ainda vem sendo pouco empregado, sendo utilizado de forma mais expressiva no meio acadêmico (Buncher; Durva, 2003).

Caracterizar os materiais de pavimentação é uma atividade complexa, considerando que as propriedades desses materiais dependem de múltiplos fatores, entre eles: meio ambiente, frequência das cargas, magnitude, tempo de aplicação e estado de tensões. Com relação as misturas asfálticas, o envelhecimento gradativo ocasionado pela oxidação do ligante, aumenta a complexidade, tornando difícil a simulação desse fenômeno em laboratório para uma correta caracterização desses materiais e suas combinações. Desta maneira, a caracterização das misturas demanda um balanço apropriado entre rigor e praticidade, já que nem todas as variáveis podem ser consideradas simultaneamente, pelo menos não no estágio atual de conhecimento. Privilegiam-se então

os aspectos considerados de maior relevância para a previsão do comportamento das misturas asfálticas (Bernucci *et al.* 2008).

2.3.1 Dosagem Superpave - Superior Performing Asphalt Pavements

O Congresso dos Estados Unidos, em 1987, estabeleceu o *Strategic Highway Research Program* (SHRP), sendo esse um plano de estudos visando a melhoria do desempenho, durabilidade e a segurança das estradas. Tendo como um dos principais resultados novos métodos de avaliação dos ligantes asfálticos para pavimentação, conhecido como Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*), sendo criado a partir da comum análise volumétrica dos métodos de *Hveem* e *Marshall*.

O método privilegia a avaliação das propriedades reológicas por ensaios mais representativos do que os atuais, baseadas nos ensaios tradicionais de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade. Além disso, abrange o dimensionamento de misturas asfálticas ajustadas aos requisitos de desempenho ditadas pelo tráfego e pelas condições ambientais (clima). E ainda, facilita a seleção e a combinação do ligante asfáltico, do agregado, e algum modificante necessário para atingir o nível desejado do desempenho do pavimento.

Assim sendo, esse sistema especifica materiais, projeta e analisa misturas asfálticas, e ainda, prevê desempenho de pavimentos, incluindo equipamentos de ensaios, métodos e critérios. A sua aplicação depende do volume de tráfego ou de outra forma de classificação funcional da rodovia.

A nova especificação para ligantes asfálticos é baseada em medidas de propriedades fundamentais relacionadas de forma racional ao desempenho dos pavimentos (Faxina, 2006). Mantendo o parâmetro de avaliação da característica dos ligantes fixo, na especificação Superpave, verifica em qual temperatura usual se satisfaz o valor especificado daquele material em teste. Sendo então, estabelecidos novos ensaios, realizados em temperaturas baixas, médias e altas de uso do CAP em campo, com base nessa nova classificação dos ligantes asfálticos.

Os ligantes são ensaiados em temperaturas relacionadas ao seu ciclo de utilização que indicam o seu grau de desempenho (*Performance Grade* – PG). O grau de desempenho de um ligante asfáltico é denominado pelas letras “PG” acompanhadas por dois números que representam a faixa de temperatura em que o ligante pode ser utilizado (Marques, 2004). Assim, a base desta proposta é que os ligantes possam ser avaliados a partir de uma ampla faixa de temperaturas, garantindo portanto, todas as etapas do processo de mistura, espalhamento e compactação, e associadas às temperaturas do pavimento ao longo da vida útil do trecho onde aquele material será utilizado.

O Superpave foi desenvolvido em três níveis de projeto de misturas, em função do tráfego, segundo Marques (2004). O 1º nível refere-se a tráfego com carga de eixo equivalente (ESAL – *Equivalent Axle Loads*) abaixo de 10^6 , sendo requerido para esse nível apenas o projeto volumétrico dos corpos de prova cilíndricos. Envolve a moldagem de corpos de prova usando o Compactador Giratório Superpave, a seleção do teor de ligante é baseada na % de vazios (Va), nos vazios do agregado mineral (VAM), na % de vazios preenchido com asfalto (VFA) e razão filer / asfalto.

O 2º nível trata o tráfego com ESAL entre 10^6 e 10^7 . Considera o projeto volumétrico como ponto de partida e uma bateria de testes com os equipamentos: Analisador de cisalhamento Superpave (Superpave *Shear Tester* – SST) e Analisador de Tração Indireta (*Indirect Tensile Test* – IDT) que são testes de previsão de desempenho. O 3º nível é para tráfego com ESAL acima de 10^7 . Englobando as etapas dos níveis 1 e 2 e testes adicionais com o SST e IDT em uma faixa mais ampla de temperatura e ensaios com corpos de prova confinados, conhecidos como Testes de Predição Estendidas. Sendo a previsão de desempenho do nível 3 mais confiável, pois baseia-se em um grupo de ensaios maior.

Os níveis 2 e 3 tinham como proposta inicial que os resultados dos ensaios, relacionados a um programa de computador, gerasse uma previsão de desempenho de revestimentos asfálticos. Porém, essa abordagem foi excluída, devido a uma falta de precisão do programa em prever afundamentos em trilha de roda e trincamentos por fadiga (NCHRP, 2011).

Nesse caso, o método em seu nível 1 exibe semelhanças ao método Marshall no que diz respeito à avaliação de parâmetros volumétricos, no entanto, o processo de compactação é executado utilizando o compactador giratório Superpave (CGS) que, normalmente, produz amostras com 150 mm de diâmetro (Asphalt Institute, 2011).

A compactação realizada pelo compactador giratório aplica uma pressão constante de 600 kPa na amostra durante o processo. O molde é colocado em um ângulo de $1,25^\circ$ e sua base gira a 30 revoluções por minuto. Mede-se a altura da amostra para cada giro e, assim, consegue estimar a densidade do corpo de prova durante a compactação (Asphalt Institute, 2001). As misturas no Superpave, assim como em outros métodos, são projetadas para um nível particular de energia de compactação. Nesse caso, esse esforço é determinado em termos de número de giros no CGS e é função do tráfego (Bernucci *et al.*, 2008).

O teor de asfalto de projeto precisa ser selecionado de modo a produzir 96% da G_{mm} (densidade máxima teórica) a um dado nível de N_{des} (número de giros de projeto), conforme especificação do Superpave. Ademais, a mistura projetada deve oferecer um G_{mm} de 89% (min) e de 98% (max) para o N_{ini} (número de giros inicial) e para o N_{max} (número de giros máximo), respectivamente (Nascimento, 2008).

Conforme relatam Cominsky, Leahy e Harrigan (1994), toda mistura que seja compactada acima de 98% da G_{mm} no laboratório, exibe disposição à densificação excessiva ou afundamento em trilha de roda no campo. A Tabela 2.5 apresenta os números de giros indicados para cada classe de tráfego do Superpave.

Tabela 2.5 – Número de giros em função do tráfego.

Tráfego de projeto ($\times 10^6$)	Número de Giros		
	N_{ini}	N_{des}	N_{max}
< 0.3	6	50	75
0.3 a 3	7	75	115
3 a 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

Fonte: *Asphalt Institute*, 2001.

Basicamente, o método Superpave em seu Nível 1 é estabelecido em quatro etapas principais, sendo estas, seleção dos materiais; seleção do projeto estrutural do agregado; seleção do teor de projeto e; avaliação da sensibilidade à água (Marques, 2004).

A primeira etapa define o ligante asfáltico e os agregados a serem utilizados no projeto considerando fatores ambientais e de tráfego. Na segunda etapa, determina-se os requisitos volumétricos das misturas, o teor de pó (passante na peneira 0,075 mm) e estima-se o teor de ligante. Na etapa subsequente, a finalidade é a escolha do teor de asfalto de projeto. Nessa fase, são moldados dois corpos de prova de mesma estrutura pétreia e com cinco teores de asfalto diferentes: no teor estimado e com variações em relação a este teor de $\pm 0,5\%$ e de $\pm 1\%$. O teor de projeto é determinado para o volume de vazios de 4%, sendo todos os demais parâmetros volumétricos estudados para esse teor, de modo a verificar se os critérios especificados são atendidos.

Os critérios volumétricos do *Asphalt Institute* (2001) são similares aos adotados no método Marshall, mostrando variação apenas quanto à consideração do tráfego (Tabela 2.6). Por fim, faz-se uma avaliação da resistência ao dano por umidade induzida nas misturas compactadas através do ensaio *Lottman*.

Tabela 2.6 – Requisitos volumétricos do Superpave para o projeto de misturas asfálticas.

ESAL (x10 ⁶)	%G _{mm}			VMA Mínimo (%)				VFA (%)	Relação pó- ligante
	N _{ini}	N _{des}	N _{max}	TMN (mm)				(%)	
				25	19	12,5	9,5		
< 0.3	≤ 91,5	-	-	-	-	-	-	70 - 80	0,6 - 1,2
0.3 a 3	≤90,5							65 - 78	
3 a 10		96	98	12	13	14	15		
10 a 30	≤89							65 - 75	
≥30									

Fonte: *Asphalt Institute*, 2001.

Segundo o NCHRP (2011), o sistema Superpave vem demonstrando êxito em vários aspectos, principalmente na avaliação dos ligantes asfálticos. Com relação ao desempenho dessas misturas em campo, essa metodologia retrata melhores resultados em termos de

resistência ao afundamento em trilha de roda. Presentemente, empresas rodoviárias americanas expressaram preocupações em relação ao trincamento e à permeabilidade dos revestimentos com misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave. Este fato, levou a alteração da sistemática de dosagem com vistas à solução dos problemas apurados, e de outros aspectos associados aos materiais e condições específicas de cada região (NCHRP, 2011).

Peterson *et al.* (2003), classificaram o comportamento mecânico de amostras compactadas em campo e em laboratório, variando os seguintes padrões de compactação no CGS: ângulo de giro, altura do corpo de prova e pressão vertical de carregamento, sendo mantidas todas as outras condições fixas quanto aos materiais e à temperatura de compactação. Os resultados indicaram que durante a compactação no CGS, mantendo os mesmos materiais e para um mesmo volume de vazios, são confeccionadas amostras com significativas variações nos parâmetros mecânicos comparados àqueles de campo. Os autores indicam a compactação de amostras com 50 mm de altura para os compactadores em que no ângulo de giro é fixado em $1,25^\circ$, justificado por uma maior aproximação das condições em que se conseguiu um comportamento mecânico apresentado nos corpos de prova de campo.

O *Nevada Department of Transportation* (NDOT) optou por um monitoramento de seções com misturas asfálticas dosadas pelo Superpave e pelo Hveem para posterior comparação, após cinco anos de operação. Sebaaly *et al.* (2004), apuraram que os teores de ligante de projeto obtidos através desses métodos eram próximos em determinados casos, entretanto em outros a diferença era de até 1%. Constatou-se ainda que, as seções em que foram empregadas as misturas dosadas pelo método Hveem apresentaram um desempenho melhor ou igual àquelas em que se aplicou o procedimento do Superpave. E que, os corpos de prova extraídos de seções exibiram valores de módulo de resiliência maiores e menor propensão à deformação permanente comparadas as amostras Superpave de campo.

Harmelink; Shuler e Aschenbrener (2008), também mencionam problemas de pavimentos construídos com misturas preparadas com a metodologia Superpave, apontando teores de projeto menores que aqueles obtidos para misturas asfálticas

correspondentes e que demonstraram sucesso ao longo dos anos. Segundo os autores, verificou-se um acréscimo nos custos de compactação das misturas para atingir a densidade alvo de 94% da Gmm, haja vista que o menor consumo de asfalto na mistura demanda maior esforço de compactação em campo.

Além disso, os pavimentos dessa sistemática danificaram-se prematuramente pelo dano por umidade, fato esse certificado, porque após seis anos de operação o volume de vazios era expressivamente maior do que os 4% de projeto. Harmelink; Shuler e Aschenbrener (2008), sugeriram, portanto, o ajuste do número de giros recomendados pelo Superpave de maneira a obter um V_a mais próximo de 4% em campo após 3 anos de operação.

Watson *et al.* (2008), elaboraram um comparativo do método Superpave com o método Marshall, examinando o desempenho de misturas asfálticas projetadas. Nessa avaliação, os autores explanaram o efeito do número de giros e o conceito de “*locking point*”, definido como o ponto em que a estrutura do agregado começa a travar e, assim, números de giros acrescidos criam um maior potencial de quebra do agregado, complicando a compactação em campo.

Os autores esclarecem que, se o número de giros sofre um aumento acima do “*locking point*”, a densidade das amostras continua se elevando devido ao aumento da quantidade de partículas mais finas geradas pela quebra das partículas maiores que irão preencher os espaços vazios da estrutura. Em campo, essa circunstância, ocasiona superfícies de agregados não ligadas, tornando a mistura mais vulnerável ao dano por umidade, o que antecipa a deterioração do pavimento. Um dos fatores mais críticos quanto ao conceito de “*locking point*” (LP) é determinar em que momento ele sucede, Vavrik, Fries e Carpenter (1999), descrevem o LP como o primeiro de três giros consecutivos que fornecem a mesma altura (Li; Gibson, 2011).

Watson *et al.* (2008), averiguaram que misturas dosadas pelo método Superpave dificilmente resultarão no volume de vazios de 4% em campo no decurso da vida útil do pavimento. Após 5 anos de operação, o volume de vazios encontrados em campo das misturas Superpave foi de 5,7% e de 3,8% para as misturas Marshall. Apesar disso, para o número de giros menor (66 giros) há a reprodução da densidade de campo.

Demais autores que investigaram a metodologia Superpave foram Kabir *et al.* (2011), analisando os defeitos em virtude de oito a dez anos de operação de rodovias do Estado da Louisiana com revestimentos asfálticos em que as misturas foram dosadas por esta sistemática. De forma geral, os pavimentos apresentaram um bom desempenho quanto ao afundamento em trilha de roda e à irregularidade longitudinal, no entanto, esse bom resultado não se aplica na avaliação quanto ao trincamento por fadiga, que mostrou condição superficial boa a pobre. E dessas trincas, 75% dos casos foram classificadas como média severidade e 4% como de alta severidade.

A metodologia Superpave abarca conceitos como pontos de controle e zona de restrição. Em princípio, acreditava-se que a melhor graduação dos agregados nas misturas asfálticas seria a que fornecesse a graduação mais densa, uma vez que esta graduação proporciona uma estabilidade maior devido ao contato entre as partículas e reduzidos vazios no agregado mineral. No entanto, a ocorrência de espaços vazios é necessária para que ocorra a incorporação do ligante asfáltico, e assim, garanta durabilidade e ainda permita algum volume de vazios na mistura para evitar exsudação. Muitos pesquisadores recomendaram faixas granulométricas para a densidade máxima. (Bernucci *et al.* 2008).

Segundo (Bernucci *et al.* 2008), o tamanho do molde adotado na dosagem Superpave é um aspecto importante. Normalmente, é utilizado o molde de 150mm de diâmetro, solicitado nas especificações Superpave, mas o Compactador Giratório Superpave (CGS) permite moldagem de corpos-de-prova com 100mm, sendo esta última adotada no equipamento utilizado neste estudo. Jackson e Cozor (2003), em seus estudos não perceberam diferença expressiva no percentual da massa específica máxima (%Gmm) para os corpos-de-prova moldados com o cilindro de 100mm e 150mm.

O projeto de mistura em sua totalidade é realizado com o CGS, um equipamento portátil, prático, com boa repetibilidade e reprodutibilidade. Um modelo de CGS padronizado pelo Superpave possui, em geral, características como ângulo de rotação de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$; taxa de 30 rotações por minuto; tensão de compressão vertical durante a rotação de 600kPa (Bernucci *et al.* 2008).

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo identifica e caracteriza os materiais que foram adotados nesta pesquisa, e discorre sobre a metodologia e os procedimentos executados em laboratório com a finalidade de analisar a viabilidade técnica da utilização de escória de ferro silício-manganês como agregado em misturas asfálticas. Para tanto, serão ensaiadas escórias provenientes da Vale Manganês S/A, sediada em Ouro Preto, para investigação do material e avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

3.1 Amostragem

3.1.1 Ligante asfáltico

Para o desenvolvimento do estudo utilizou-se o ligante asfáltico proveniente da TAMASA Engenharia S.A., localizada no município de Ribeirão das Neves/ MG. O ligante em estudo é classificado como CAP 30/45, e produzido pela PETROBRAS/RLAM/BA. O processo básico de produção do ligante asfáltico ou CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) é a destilação, que pode ocorrer em um único estágio ou em dois, dependendo do petróleo processado (Leite, 1999).

3.1.2 Escória de ferroliga de manganês

A escória estudada é proveniente da Mineração Vale Manganês S/A, localizada no município de Ouro Preto/MG. Na Figura 3.1, tem-se uma vista geral da empresa.



Figura 3.1 - Vista Geral da Mineração Vale Manganês S.A., localizada em Ouro Preto-MG.

A empresa produz ferroligas de manganês, um dos insumos para a composição do aço. Existem basicamente três tipos de ferroligas de manganês: Ferro-Manganês Alto Carbono (FeMnAC); Ferro-Sílico Manganês (FeSiMn) e Ferro-Manganês Médio/Baixo Carbono (FeMnMC/FeMnBC). A escória em estudo é a Ferro-Sílico Manganês (FeSiMn). A quantidade total de escória gerada diariamente depende do *blend* de minério, no entanto, estima-se uma produção de 138 t/dia a 161 t/dia, dado referente ao ano de 2017.

O processo de resfriamento da escória na Vale Manganês S/A é realizado de forma lenta, ao ar livre e as trocas térmicas são feitas com a atmosfera. Em relação aos estoques de produção da escória, estes são armazenados em pilhas no pátio de estocagem, ilustrado na Figura 3.2, e não apresentam datas de fabricação. No entanto, os responsáveis afirmam que o tempo de estocagem é de cerca de dez anos.



Figura 3.2 - Armazenamento da escória em pilhas no pátio de estocagem.

A escória produzida é britada na Central de Britagem dentro da própria unidade por um britador de mandíbulas 62/40, e separada em diferentes graduações: escória de 0 à 3/8", escória de 0 à 1/2" e escória de 1". Em alguns casos específicos, quando por questões de processo, a escória é recirculada no forno, e brita-se, para esta finalidade, na granulometria de 0 x 50 mm. No entanto, quando a mesma é destinada para a estocagem, não há britagem e estima-se que a granulometria varia de 0 x 200 mm, conforme Figura 3.3.



Figura 3.3 - Detalhe evidenciando as diferentes granulometrias da escória estocada.

A coleta da escória para utilização na presente pesquisa, foi realizada por “corrida”/“vazamento”. Foram coletadas, inicialmente, 240 kg de amostra, classificadas granulometricamente pela Vale Manganês, conforme o Quadro 3.1.

Materiais	Dimensões	Peso (kg)
Escória grossa (similar a brita 2)	9,5mm a 31,5mm	80
Escória média (similar a brita 1)	4,75mm a 25mm	80
Escória fina (similar a brita 0)	2,36mm a 12,5mm	80

Quadro 3.1 - Dados das amostras iniciais.

O material para análise foi acondicionado em uma área externa do laboratório de pavimentação da empresa Via 040, onde serão preparadas as amostras para dar início aos ensaios, a escória será homogeneizada e a redução de amostra de campo para o laboratório seguirá o procedimento DNER-PRO 199/96, com a utilização do método por quarteamento.

3.1.3 Agregado Pétreo

O agregado pétreo utilizado neste estudo para produção de mistura de referência é proveniente da Pedreira Borges, situada em Pedro Leopoldo/MG, e foi fornecido pela TAMASA Engenharia S.A, que se localiza no município de Ribeirão das Neves/ MG. Foram coletados 150 Kg de amostras do agregado pétreo com granulometria referente a brita 0, brita 1 e brita 2. Além de 50 kg de pó de pedra e areia, que também serão incorporados nas misturas asfálticas.

3.2 Ensaios laboratoriais dos agregados

A investigação dos materiais e das misturas asfálticas foi dividida em três etapas. Inicialmente, foram caracterizados os materiais utilizados como matéria prima das

misturas asfálticas. Na segunda etapa, realizaram-se ensaios para a determinação do teor de projeto das misturas betuminosas. A terceira etapa consiste na avaliação mecânica das misturas por meio dos ensaios de módulo de resiliência (MR), resistência a tração estática por compressão diametral (RT) e fadiga por compressão diametral a tensão controlada.

Os ensaios foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da UFOP e da UFJF, e também no Laboratório de Pavimentação Avançada da empresa VIA040, situado no município de Nova Lima/MG.

3.2.1 Ensaios físicos

- **Análise granulométrica**

O procedimento para a determinação da granulometria consiste em se estabelecer a distribuição das partículas de agregado por tamanho. Estão ligadas a esse processo diversas propriedades de uma mistura asfáltica, tais como: estabilidade, durabilidade, permeabilidade, resistência à fadiga e resistência à deformação permanente (Cunha, 2004).

Uma distribuição granulométrica adequada ao tipo de mistura asfáltica que se quer produzir é um dos pontos chave para a elaboração de uma mistura de bom desempenho a curto, médio e longo prazo, já que tantas propriedades importantes são afetadas por essa. Com isto, a graduação, assim como as especificações a ela relacionadas, deve ser considerada como sendo o primeiro passo para a elaboração de uma boa mistura asfáltica

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos empregados nesta análise foi avaliada conforme a metodologia DNER-ME 083/98 (Agregados-análise granulométrica), empregando o peneiramento manual, com a seguinte série de peneiras: 76,2mm; 50,8mm; 38,1mm; 25,4mm; 19,05mm; 12,7mm; 9,5mm; 4,8mm; 2,4mm; 2mm; 1,2mm; 0,6mm; 0,42mm; 0,3mm; 0,18mm; 0,15mm e 0,075mm. A Figura 3.4 exemplifica alguns materiais separados em diferentes graduações na etapa do peneiramento.

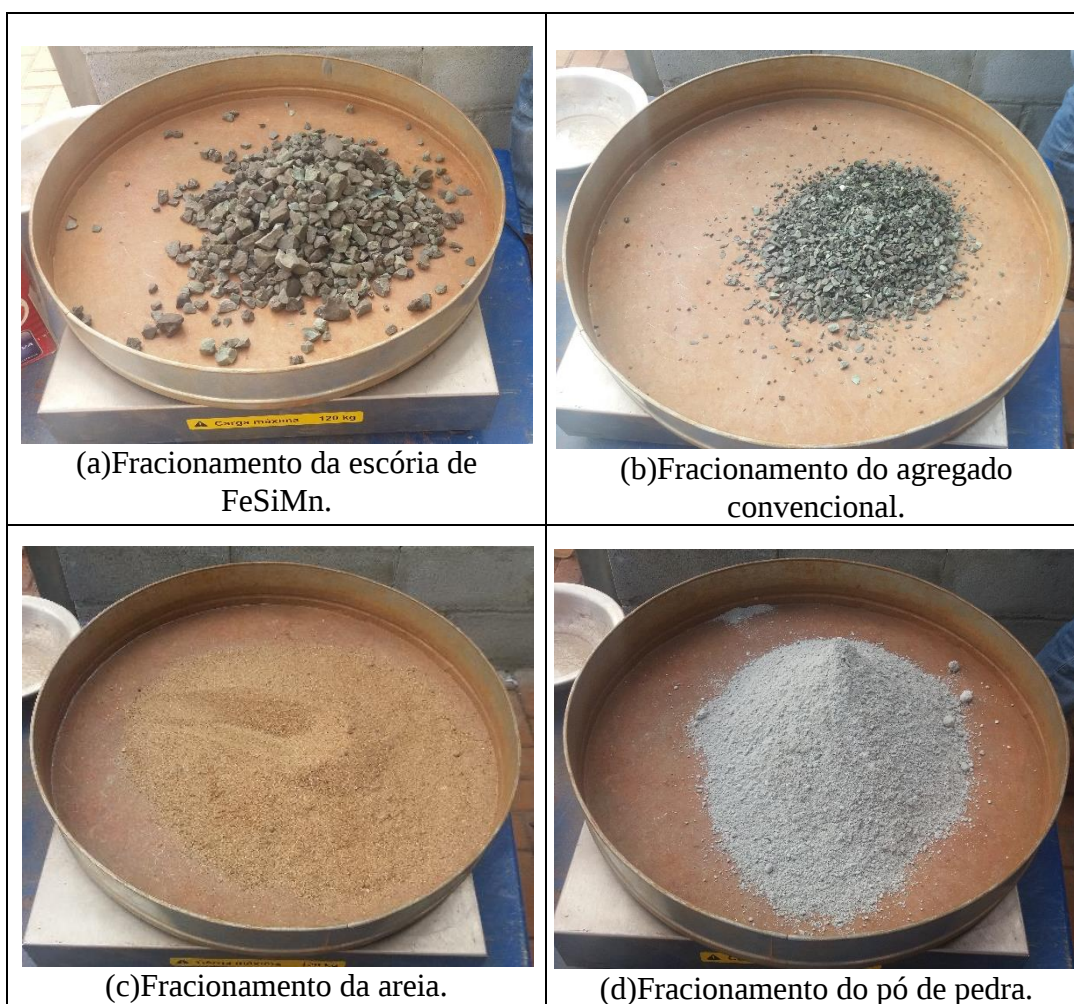


Figura 3.4 - Amostras do material peneirado e separado por faixa granulométrica.

- **Abrasão Los Angeles**

O ensaio de abrasão *Los Angeles* quantifica o desgaste sofrido pelo material, resultante das ações combinadas do atrito e do impacto, através de um ensaio rotacionado a um número especificado de revoluções, junto a cargas abrasivas (esferas metálicas) no equipamento padrão, ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Equipamento e cargas abrasivas usados no Ensaio de abrasão *Los Angeles*.

Esse desgaste é quantificado através da porcentagem de material quebrado durante o ensaio, resultado da degradação mecânica. Assim, o índice de Abrasão *Los Angeles* foi calculado a partir da diferença da massa total seca antes e após o ensaio, e apresentado em porcentagem.

Os ensaios de abrasão *Los Angeles* foram realizados em graduações padronizadas, conforme especificado pelos métodos de ensaios do DNER ME 035/98. As graduações empregadas estão indicadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Graduação para o ensaio Los Angeles da norma ME 035/1998.

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
63	50	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
50	38	—	—	—	—	5000 ± 50	5000 ± 50	—
38	25	1250 ± 25	—	—	—	—	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	—	—	—	—	—	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
9,5	6,3	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
6,3	4,8	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
4,8	2,4	—	—	—	5000 ± 10	—	—	—

Fonte: Adaptado da Norma DNER ME 035/1998.

O ensaio foi executado na faixa em que o material se enquadra para pavimentação asfáltica. Em razão das amostras obtidas apresentarem granulometrias mais próximas da graduação B e C, foram realizados ensaios tanto para as escórias quanto para o agregado convencional, em cada uma destas graduações. Foram realizadas 500 rotações do tambor, e a massa utilizada foi de aproximadamente $5.000 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$ para cada ensaio, sendo adotadas 11 esferas de aço de carga abrasiva para a graduação B e 08 para a graduação C, sendo a carga abrasiva de $4.584 \text{ g} \pm 25 \text{ g}$, $3.330 \text{ g} \pm 20 \text{ g}$ para as graduações B e C, respectivamente.

- **Índice de Forma**

O índice de forma de um agregado possibilita avaliar as condições de uma amostra de agregado graúdo segundo seu formato, ou seja, classificá-lo de acordo com suas características geométricas. Esta, influencia na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade. Conforme considerado em literatura, a forma ótima de um agregado para mistura asfáltica é a cúbica. Bernucci *et. al.* (2008), explana que as partículas irregulares ou de forma angular, como pedra britada e algumas areias de brita, predispõe a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados, tanto maior quanto mais cúbicas forem as partículas e mais afiadas forem suas arestas.

As Normas no Brasil para o ensaio de índice de forma sofreram alterações nos últimos anos, no intuito de melhorar a forma de operacionalização do ensaio e a classificação dos agregados. Neste estudo, foi adotada a NBR 7809/2006 – Versão corrigida: 2008 – Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Sendo que a amostra ensaiada são 200 grãos, fazendo a medição das dimensões comprimento e espessura, e, então, calculada a razão entre estes, obtendo-se o índice de forma do agregado.

Ainda, é importante destacar a NBR 12948: 1993 – Materiais para concreto betuminoso usinado a quente – Especificação, que menciona o índice de forma dos agregados a serem adotados nas misturas asfálticas a quente. Para que um agregado seja

aceito para utilização em misturas asfálticas a quente, seu índice de forma deve ser menor ou igual a dois.

- **Durabilidade**

Segundo Bernucci *et al.* (2008), alguns agregados que inicialmente exibem adequadas características de resistência podem sofrer processos de desintegração química ao serem expostos as condições ambientais no pavimento.

A avaliação da resistência a desintegração química dos agregados usando o Sulfato de Sódio ou Magnésio, mede a sanidade por meio da porcentagem de material perdido durante o tratamento com sulfato de sódio ou magnésio e serve para estimar a resistência ao intemperismo do agregado no campo. Adotou-se a norma DNER – ME 089/94 (Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio) que apresenta o procedimento de ensaio.

A amostra de escória e do agregado convencional foi imersa em uma solução de sulfato de sódio (NaSO_4) durante cerca de 16 horas. Em seguida, a amostra foi drenada e seca em estufa à 110°C. Sendo este processo reproduzido cinco vezes (ciclos), adotando uma temperatura constante de 21°C. A perda de massa medida, foi definida como a porcentagem em peso de cada fração da amostra que após o ensaio passou na peneira na qual originalmente era retida. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Ferrovias e Asfalto - LFA da Universidade Federal de Ouro Preto/MG. A Figura 3.6 mostra os materiais utilizados nesse ensaio.



Figura 3.6 - Etapas do ensaio de durabilidade do agregado convencional e escória.

- **Densidade e Absorção**

Segundo Pinto (2000), as relações entre quantidade de matéria (massa) e volume são designadas massas específicas, e expressas geralmente em t/m^3 , kg/dm^3 ou g/cm^3 . O autor relata que, a expressão densidade, bastante empregada na engenharia, refere-se a massa específica, e densidade relativa representa a relação entre a densidade do material e a densidade da água a 4°C. Tem-se que a densidade relativa tem igual valor numérico que a massa específica, porém é adimensional, assim é comum se estender o conceito de densidade relativa a relação dos pesos e adotar-se como peso específico a densidade relativa do material multiplicada pelo peso específico da água.

A massa específica real (G_{sa}), em g/cm^3 , é calculada através da relação entre a massa seca e o volume real. Já a massa específica aparente (G_{sb}), em g/cm^3 , é obtida quando se avalia o material como um todo, forma aparente, sem subtrair os vazios. Sua determinação se dá dividindo a massa seca pelo volume aparente do agregado, que engloba o volume de agregado sólido e o volume dos poros superficiais contendo água.

Os ensaios para a determinação das massas específicas (densidades) e absorção das amostras, foram realizados separando agregados graúdos de miúdos, sendo os agregados miúdos o material passante na peneira de abertura 4,75mm, mais precisamente, o pó de pedra e a areia. Para a fração graúda, britas e escórias, adotou-se o procedimento DNER-ME 081/94, já para a fração miúda, foi usado o procedimento DNER ME 084/94 para o pó de areia e as instruções do DNER-ME 194/98 para a areia, conforme Figura 3.7, sendo que para os agregados miúdos, definiu-se apenas a massa específica real dos agregados.

Adotou-se o método de ensaio DNER-ME 081/94, no qual se especifica a determinação das densidades de agregados graúdos, utilizando o conceito de densidade relativa. A norma ABNT NBR NM 53/2003, determina o método de obtenção da massa específica na condição seca, correspondente ao denominado G_{sa} , e massa específica na condição de superfície saturada seca, chamado aqui de G_{sb} , bem como da absorção. Como procedimento de ensaio são feitas três determinações de massa: massa seca, massa na condição superfície saturada seca e massa imersa.

O método de ensaio DNER-ME 084/95 foi empregado para a determinação da densidade de agregados miúdos, com a denominação de densidade real dos grãos. Esse procedimento é semelhante ao do ensaio para determinação da massa específica aparente seca (G_{sa}) de solos (DNER-ME 093/94) e faz uso de um picnômetro de 50ml.



Figura 3.7- Determinação da massa específica real dos agregados graúdos e miúdos.

A absorção é a capacidade de o material reter água nos poros, calculado como o aumento da massa do material, devido ao preenchimento dos poros permeáveis por água. O tamanho e a distribuição dos tamanhos dos poros podem determinar a quantidade e o mecanismo de absorção. No caso do agregado miúdo, a condição de superfície saturada seca não é fácil de ser observada visualmente como no agregado graúdo e, portanto, a

possível absorção das partículas não é verificada no método DNER, não sendo possível este cálculo.

A Figura 3.8 mostra esquematicamente a determinação das massas A, B e C para o cálculo da G_{sa} , G_{sb} e absorção.

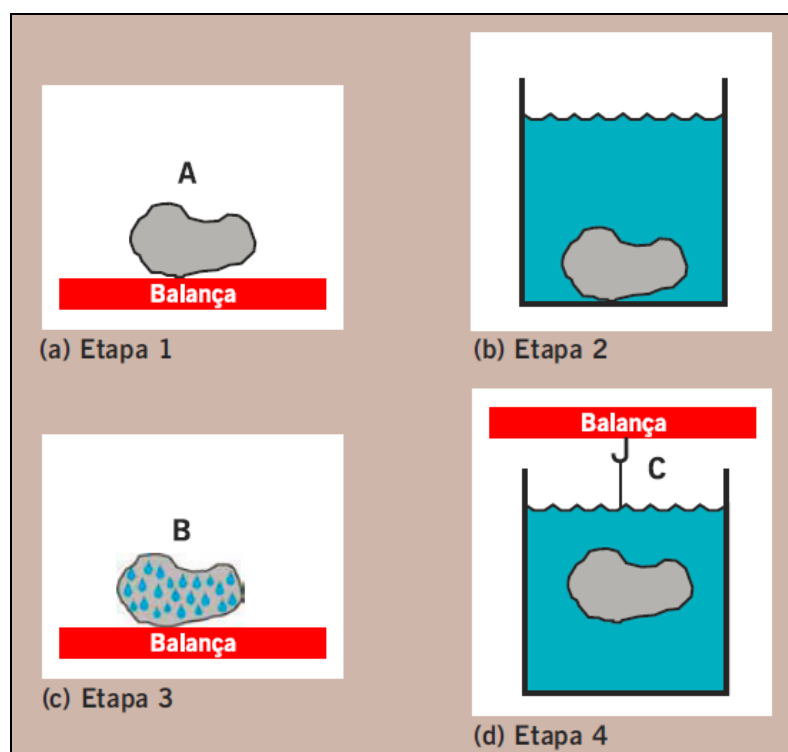


Figura 3.8 Esquema de determinação de massas no método ABNT NM 53/2003 – errata 2006.

Fonte: Bernucci *et al*, 2008.

- **Adesividade**

A avaliação da adesividade ao ligante seguiu a norma DNER – ME 078/94 (Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso). Este ensaio verifica a adesividade entre a película de ligante e os grãos do agregado graúdo, e consiste na submersão da amostra em água destilada a 40 °C durante um período de 72 horas. Etapas do ensaio são mostradas na Figura 3.9.

O ensaio é dito satisfatório quando não há deslocamento da película de asfalto e não satisfatório quando há. Este ensaio vem sendo questionado no meio técnico devido à sua subjetividade. Trata-se de uma avaliação visual fornecida pelo executor do ensaio. Alguns autores preferem utilizar a metodologia AASHTO T – 283 (Resistência à tração retida por umidade induzida) (Bernucci *et al.*, 1999). Neste estudo não foi realizado este método.

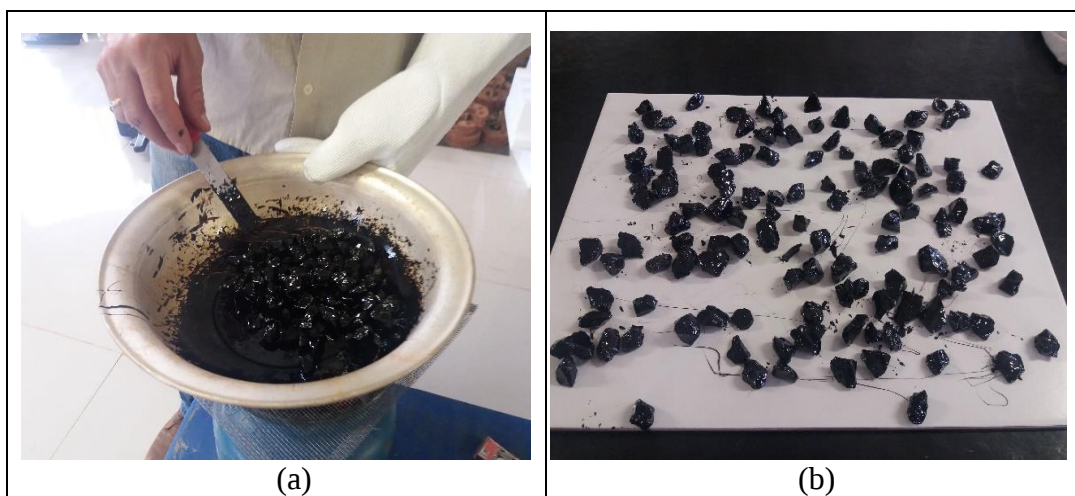


Figura 3.9 – Ensaio de Adesividade.

- **Massa unitária**

A massa unitária é empregada como medida indireta da quantidade de vazios presentes entre os grãos de agregados e para transformar quantidades de material de peso para volume e de volume para peso. Sua determinação foi realizada a partir da norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), que institui o método para a determinação da densidade a granel e do volume de vazios de agregados miúdos, graúdos ou de mistura dos dois, em estado compactado ou solto.

A execução do ensaio, Figura 3.10, sucedeu registrando a massa do recipiente vazio e em seguida, o recipiente é cheio até transbordar, utilizando uma concha, despejando o agregado de uma altura que não ultrapasse 50 mm acima da borda superior do recipiente. A camada superficial do agregado foi nivelada, de forma a coincidir com a

borda superior do recipiente e após, calculou-se a medida da massa do recipiente mais seu conteúdo.

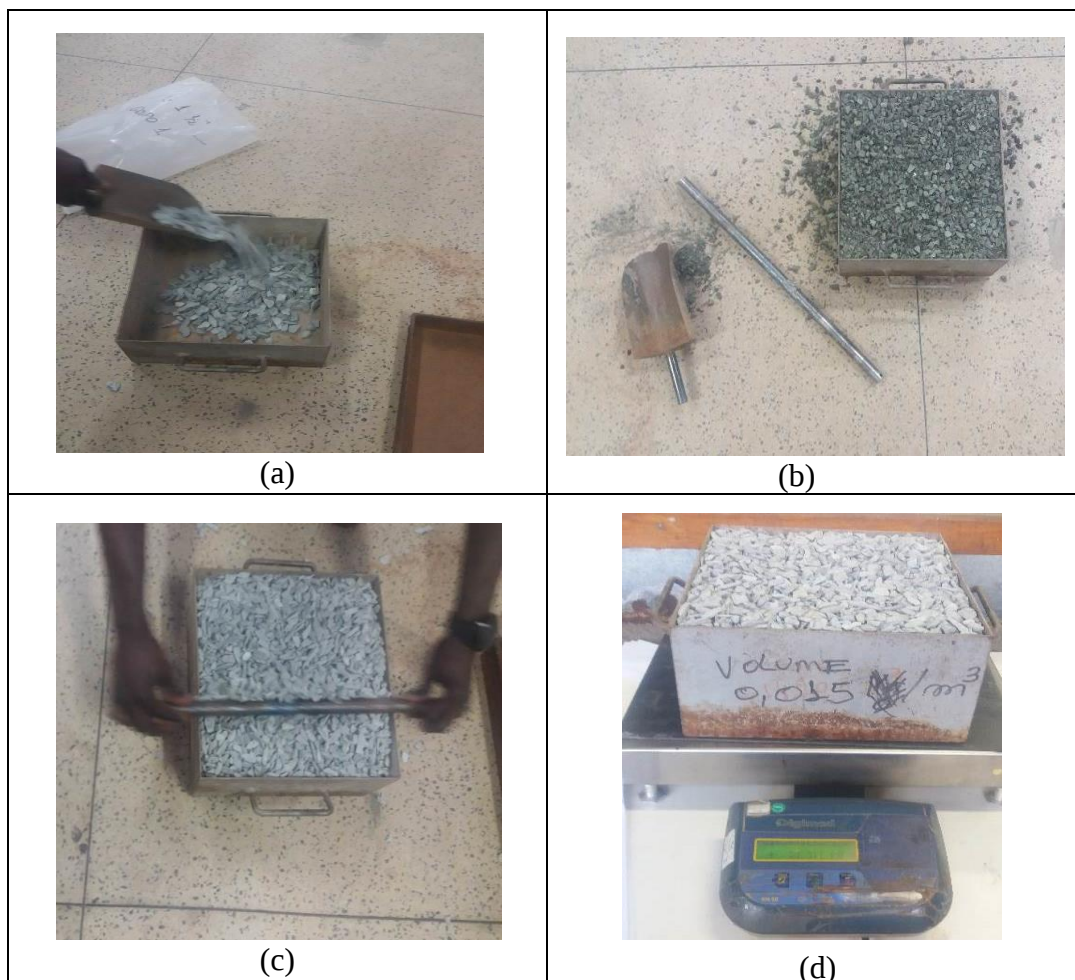


Figura 3.10 – Etapas da execução do ensaio de Massa Unitária.

3.2.2 Ensaios Químicos e Ambientais

A metodologia adotada para a determinação da caracterização química e ambiental foi de ensaios prescritos pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), AREMA (*American Railway Engineering and Maintenance Association*) e ASTM (*American Society of Testing Materials*).

Estes ensaios foram realizados pela Vale S/A, que forneceu os dados em parceria com esse estudo.

- **Análise por difração de raios X**

Por meio da difração de raios X, pode-se identificar a composição cristalina de um determinado material. As células cristalinas são formadas por planos definidos, relacionados diretamente ao raio atômico de cada um dos átomos e aos seus tipos de ligações. As distâncias interplanares, característica dos minerais presentes, aparecem como picos no difratograma. Esta técnica possui uma limitação para minerais com distâncias atômicas parecidas ou bastante heterogêneas.

A amostra é submetida a uma radiação monocromática de raios X, tendo como resposta o espaçamento d obtido pela equação de Bragg, Equação 3.1.

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad (3.1)$$

Onde:

n - É um inteiro conhecido como a ordem do eixo difratado;

λ - Comprimento da onda do tubo do aparelho;

θ - Ângulo de incidência;

d - Distância (espaçamento) interplanar.

Este processo ótico tem seus registros coletados em um detector na forma de um sinal elétrico amplificado, que é registrado na forma digital ou analógica, correspondentes aos difratogramas. Os difratogramas apresentam picos característicos que são os resultados da difração de raios X em planos cristalográficos da amostra, relacionados à posição, à intensidade e à forma da estrutura cristalina, caracterizando assim, a composição mineralógica dos materiais analisados.

Nas análises efetuadas, utilizou-se um difratômetro da marca Shimadzu, modelo D/MAXB, com tubo de ferro e intervalo de varredura de 7° a 70° e radiação de 20 kV e 5

μA . A velocidade adotada no ensaio foi de 2 graus/minutos com duração de ± 35 minutos. A análise dos resultados é processada por meio de *software* específico - MDJ Jades, que compara o pico da incidência de elétrons com um banco de dados disponíveis para caracterização dos minerais constituintes.

- **Análise Química Quantitativa**

O espectrômetro de fluorescência de raios X é um instrumento que permite a determinação quantitativa dos elementos presentes em uma determinada amostra, por meio da aplicação de raios X na amostra e a posterior análise dos raios fluorescentes emitidos.

Sendo uma técnica não destrutiva, é comumente utilizada para pesquisa e controle de qualidade de uma ampla gama de materiais. A análise por fluorescência de raios X resumidamente consiste em três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios X emitidos.

Em uma amostra, quando um elemento é excitado, este tende a expulsar os elétrons do interior dos níveis dos átomos. Por consequência, os elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada mudança eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron, e esta energia é emitida na forma de um fóton de raios X, energia característica e bem definida para cada elemento.

A medida da intensidade (número de raios X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, se baseia na análise quantitativa por fluorescência de raios X. Por meio de uma fonte radioativa são emitidos os raios X, que excitam os elementos constituintes e, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas à concentração do elemento na amostra.

As amostras utilizadas nesse ensaio passaram por dois tipos de preparação. A

primeira preparação foi realizada com 20 g de amostra pulverizada passante na peneira de 75 μm , então, a amostra foi aquecida de 100 °C a 120 °C em forno, e em seguida, foi adicionado 0,6 g de ácido estuário - $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ (atua como ‘cola’ para fixar a amostra), então a amostra passou por uma nova pulverização por 4 minutos, para misturar o material da amostra com o ácido estuário, em seguida a mistura foi prensada na forma de pastilha.

Na segunda preparação, foram utilizadas 10 g de amostra pulverizada passante pela peneira de 75 μm , em seguida, a amostra foi colocada em um anel plástico vedado por filtro de plástico e inserida uma sacola plástica com as pontas cortadas para formar vácuo na amostra durante o ensaio. Nas análises, foi utilizado um espectrômetro de raios X, modelo EDX – 700 HS / 800 HS / 900 HS da marca *Shimadsu Energy Dispersion*.

- **Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Para a observação e a distinção de diferentes tipos de minerais, a partir da emissão e interação de feixes de elétrons sobre uma amostra, foi usada a técnica da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a qual permite a caracterização do ponto de vista de sua morfologia, sua organização e sua composição química. O que se observa no microscópio eletrônico de varredura é decorrente da variação de contraste, que ocorre quando um feixe de elétrons primário varre a superfície da amostra em análise de ponto a ponto.

O funcionamento do microscópio incide na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), através da aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 kV. Essa variação de voltagem admite a variação da aceleração dos elétrons e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando em uma aceleração em direção ao eletrodo positivo. As lentes condensadoras são as responsáveis pelo alinhamento dos feixes em direção à abertura da objetiva, que ajusta o foco antes que os elétrons atinjam a amostra analisada, corrigindo assim o percurso dos feixes.

No ensaio, as amostras precisam ser condutoras em presença de carbono e, para isso, sofrem o processo de metalização. Com isso, as amostras são arranjadas sob a forma

de monocamadas em peças cilíndricas metálicas (pastilhas), revestidas de grafite por uma fita de dupla face, então são depositadas em um evaporador de vácuo por um período de aproximadamente 1 hora.

Em seguida, faz-se a vaporização dos eletrodos de grafite por cerca de 10 minutos. Terminado esse processo, as amostras tornam-se condutoras e as pastilhas são introduzidas na câmara do microscópio, fazendo um vácuo de 3 minutos.

As amostras são, então, submetidas a processos de bombardeamento de elétrons e feitas fotomicrografias. Nesse estudo, os aumentos adotados foram de 50x, 100x, 150x e 270x nas amostras, sendo utilizados diferentes equipamentos, tais como os espectrômetros de raios-x, detector de elétrons retro espalhados, detector de elétrons absorvidos e detector de elétrons transmitidos.

A análise química qualitativa dos agregados deste relatório foi realizada utilizando-se um Microscópio eletrônico de varredura do tipo JEOL JSM – 5510, do laboratório de Microscopia Eletrônica do DEGEO/UFOP.

- **Teor de Cal Livre**

Na determinação do teor de cal livre, foi usado como referência o método de ensaio prescrito pela NBR NM 13 (2004) – Cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol.

Esta norma especifica a determinação do óxido de cálcio livre por dissolução em etileno glicol e subsequente titulação em solução padronizada de ácido clorídrico (HCl), utilizando-se uma mistura como indicador de pH (solução mista de indicadores).

Para o ensaio foram pesadas três amostras contendo 1,00 g cada e misturadas em três *elemayers* com tampa, cada um contendo 30 ml de etileno glicol com pH corrigido (verde) e cacos de vidro pequenos. Depois foram aquecidos os *elemayers* em banho maria entre 65 °C a 70 °C durante 30 minutos, agitando o frasco a cada 5 minutos.

Após esse processo, foi feita a filtração com filtro de filtração lenta. A filtração

foi feita molhando-se o filtro com água destilada e em seguida ligando a bomba de vácuo para que o filtro fique bem aderido, depois foi despejado no filtro o conteúdo do *elemayer*, então se lava o precipitado do *elemayer* 2 a 3 vezes com o etileno glicol com o pH corrigido aquecido no banho-maria até no máximo 70 °C.

Depos, o filtrado é transferido para o *elemayer* limpo e são adicionadas de 3 a 5 gotas de indicador misto. Então, se titula a solução acima com HCl 0,1 mol/l até mudar de verde para rosa. Deste modo, é utilizada a formula da Equação 3.2, abaixo, para calcular o teor de cal livre.

$$\text{CaO}_{\text{livre}} = (F.V.0,002804/m) \quad (3.2)$$

Onde:

F - Fator de HCl, calculado;

m - Massa da amostra triturada empregada no ensaio;

V - Volume de HCl utilizado na titulação.

Quando o tempo é inferior a 30 dias, este método não diferencia óxido (CaO) de hidróxido [Ca(OH)₂] e não determina o cálcio que está quimicamente combinado em solução sólida com o óxido de ferro (FeO) e o óxido de manganês (MnO) ou na forma de silicatos. Entretanto, no escopo das análises pretendidas neste relatório, os resultados desse teste são mais que satisfatórios.

- **Lixiviação e Solubilização**

Os testes de lixiviação e solubilização são realizados de acordo com as Normas ABNT NBR 10005: 2004 e 10006: 2004 e todas as análises são realizadas utilizando como referências analíticas: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW), *Environmental Protection Agency* (EPA), Associação Brasileira

de Normas Técnicas (ABNT), Companhia Estadual de Saneamento Básico (CETESB-SP) e Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA-RJ). Os dados para interpretação dos resultados analíticos seguiram os parâmetros e critérios descritos abaixo.

- **Critérios Para Classificação de Resíduos Sólidos**

Foram adotados como critérios para classificação de resíduo sólido os itens das normas ABNT NBR 10004: 2004, 10005: 2004 e 10006: 2004 citados abaixo. O resíduo é classificado em:

- 1) Resíduo classe I – Perigosos
- 2) Resíduo classe II – Não Perigosos
 - IIA – Não Inertes
 - IIB – Inertes

O resíduo enquadrado como Classe I: Perigoso, é assim classificado de acordo com:

- **NORMA ABNT NBR 10004: 2004 item 4.2.1.**

Essa norma estabelece que resíduo perigoso é aquele que apresenta periculosidade, e, características apresentadas em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, que pode apresentar: risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada; ou constem como resíduos perigosos de fontes não específicas ou resíduos perigosos de fontes específicas da referida norma.

- **Avaliação de Corrosividade - NORMA ABNT NBR 10004: 2004 item 4.2.1.2 item a.**

A normativa estabelece que o resíduo que apresentar características altamente ácidas ou básicas, será caracterizado como tóxico, classe I - Perigoso.

- **Avaliação de Reatividade - NORMA ABNT NBR 10004: 2004 item 4.2.1.3 itens a, b, c, e.**

Estabelece que o resíduo que apresentar características de reação violenta com água ou liberação elevada de enxofre ou cianeto, será caracterizado como tóxico, classe I - Perigoso.

- **Avaliação de Toxicidade. NORMA ABNT NBR 10004: 2004 item 4.2.1.4 e Anexo F.**

Essa norma estabelece que: “quando o extrato obtido desta amostra segundo a ABNT NBR 10005, contiver qualquer um dos contaminantes em concentrações superiores aos valores constantes na tabela de limite máximo de concentração no extrato obtido no ensaio de lixiviação (anexo F da norma NBR 10004), o resíduo será caracterizado como tóxico, classe I - Perigoso.

Já o resíduo enquadrado como Classe II: Não Perigoso, é assim classificado, de acordo com:

- **NORMA ABNT NBR 10004: 2004 item 4.2.2.2 – Resíduo classe II B – Inerte**

Essa norma estabelece que resíduo classe II B – Inerte é “qualquer resíduo que, submetido a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006: 2004, não tiver nenhum de seus constituintes solubilizados à concentrações superiores aos padrões de potabilidade e de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme tabela Padrões p ara o ensaio de solubilização (anexo G da norma NBR 10004)”.

- **NORMA ABNT NBR 10004: 2004 item 4.2.2.1 – Resíduo classe II A – Não Inerte.**

A norma define que resíduo classe II A – Não Inerte é “aquele que não se enquadra na classificação de resíduo classe I – Perigoso ou de resíduo classe II B – Inerte,

nos termos desta Norma”.

• **NORMA ABNT NBR 10004: 2004 item 2**

O resíduo a ser classificado pela norma NBR 10004 tem como prescrição que o mesmo seja amostrado conforme a norma ABNT NBR 10007: 2004 – “Amostragem de Resíduos Sólidos”. As amostragens realizadas pela SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. seguem as determinações dessa norma.

3.2.3 Ligante Asfáltico

Foi realizada uma avaliação das principais características da classificação Superpave do asfalto CAP 30/45. No Quadro 3.2 são apresentados os ensaios de caracterização, exigidos pela ANP (Agência Nacional de Petróleo), feitos nas amostras de asfalto utilizadas nesta pesquisa.

Ensaio	Método	
	ABNT	ASTM
Penetração	NBR 6576	D5
Ponto de Amolecimento	NBR6560	D36
Viscosidade Brookfield 135°C-SP21 20RPM	NBR15184	D4402
Viscosidade Brookfield 135°C-SP21 20RPM	NBR15184	D4402
Viscosidade Brookfield 135°C-SP21 20RPM	NBR15184	D4402
RTFOT- Penetração Retida	NBR6560	D5
RTFOT- Aumento do Ponto de Amolecimento	NBR6560	D36
RTFOT- Ductilidade a 25°C	NBR6293	D113
RTFOT- Variação em % massa	NBR15235	D2872
Ductilidade a 25°C	NBR6393	D113
Solubilidade no Tricloroetileno	NBR15855	D2042
Ponto de Fulgor	NBR11341	D92
Índice de Suscetibilidade Térmica	N/A	X018
Densidade Relativa a 20/4°C	N/A	D70
Aquecimento a 177°C	N/E	N/E

Quadro 3.2 - Especificações e caracterização do CAP 30/45.

Desses ensaios destaca-se a viscosidade que tem seus resultados utilizados para a determinação das temperaturas adotadas durante o projeto das misturas asfálticas, a partir do gráfico temperatura *versus* viscosidade. A viscosidade de um ligante asfáltico é determinada como o tempo em segundos que uma determinada quantidade de material betuminoso leva para fluir através de um orifício de dimensões padronizadas, a uma temperatura determinada. Tem-se que quanto mais longo o tempo de escoamento, maior será a viscosidade do ligante asfáltico.

3.3 Misturas asfálticas a quente

3.3.1 Composição granulométrica das misturas asfálticas

A seleção do projeto estrutural do agregado foi um processo de tentativa e erro. Este passo consiste em misturar os agregados disponíveis (brita 1, brita 0, escórias, pó de pedra e areia) em diferentes porcentagens para chegar a uma granulometria que atenda aos requisitos da Faixa B do DNIT, as proporções empregadas encontram-se no Quadro 3.3. O sistema Superpave utiliza, para especificar a granulometria do agregado, um gráfico onde o eixo das abscissas é dado pela abertura das peneiras, em milímetros, elevado a potência de 0,45. Para as graduações em estudo não se buscou, a princípio, atender aos critérios Superpave, esse enquadramento será feito posteriormente.

	Mistura Convencional (%)	Mistura Escória 1 (%)	Mistura Escória 2 (%)
Brita 1	18,0	2,0	6,0
Brita 0	30,0	7,0	5,0
Escória 1	-	30,0	30,0
Escória 0	-	11,0	7,0
Pó de pedra	40,0	39,0	39,0
Areia	12,0	11,0	13,0

Quadro 3.3 – Composição de Agregados das misturas adotadas.

Duas composições próximas de escória foram testadas, 41,0% e 37,0%. Sendo a terceira composição feita a partir de agregados convencionais para comparação. Optou-se por utilizar a faixa B preconizada pela especificação DNER ES 313/97 para revestimentos do tipo CBUQ, por ser a mais usual na rodovia BR 040 atualmente. A faixa B é indicada para camadas de ligação e rolamento. Caso fosse feita a opção pelas faixas A ou C do DNER seria necessária uma correção granulométrica das misturas de escória e agregados utilizados.

A Figura 3.11, ilustra etapas da preparação dos traços de agregados, realizadas pelos laboratoristas do Laboratório de Pavimentação Avançada da Via040.

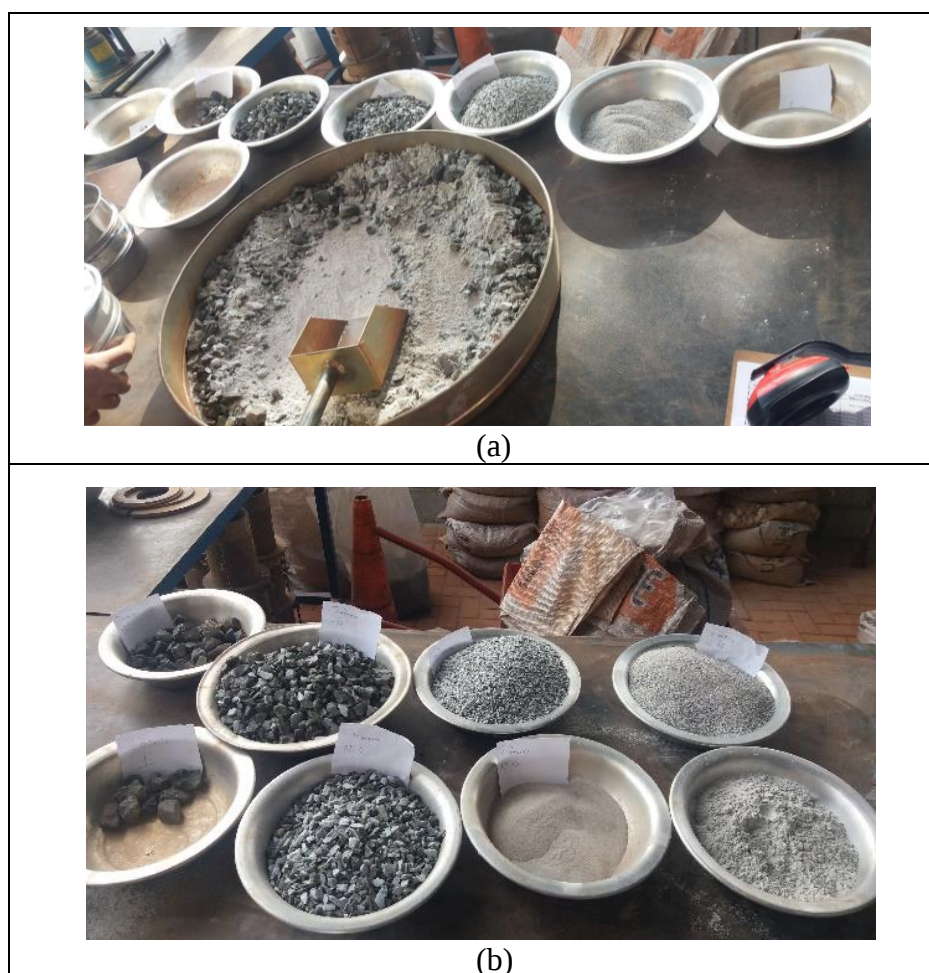




Figura 3.11- Proporção de agregados e preparação dos traços.

3.3.2 Temperatura dos Materiais

A determinação das temperaturas de trabalho, se deu em função da curva viscosidade-temperatura do ligante a partir dos resultados apresentados na Tabela 3, quanto à viscosidade *Brookfield* para 135 e 177°C. A temperatura de usinagem adotada foi aquela em que a viscosidade do ligante estivesse na faixa entre 150cP e 190cP, sendo esta 158°C. A temperatura do agregado foi definida como 15°C acima da temperatura de usinagem do ligante e sem ultrapassar 177°C, ou seja, 173 °C. A temperatura de compactação e, conseqüentemente de envelhecimento em estufa, foi aquela em que a viscosidade do ligante estivesse na faixa entre 250 e 310 cP, essa temperatura trabalhada foi de 146°C. A Figura 3.12 mostra os resultados obtidos para a definição das temperaturas de usinagem e de compactação do CAP 30/45.

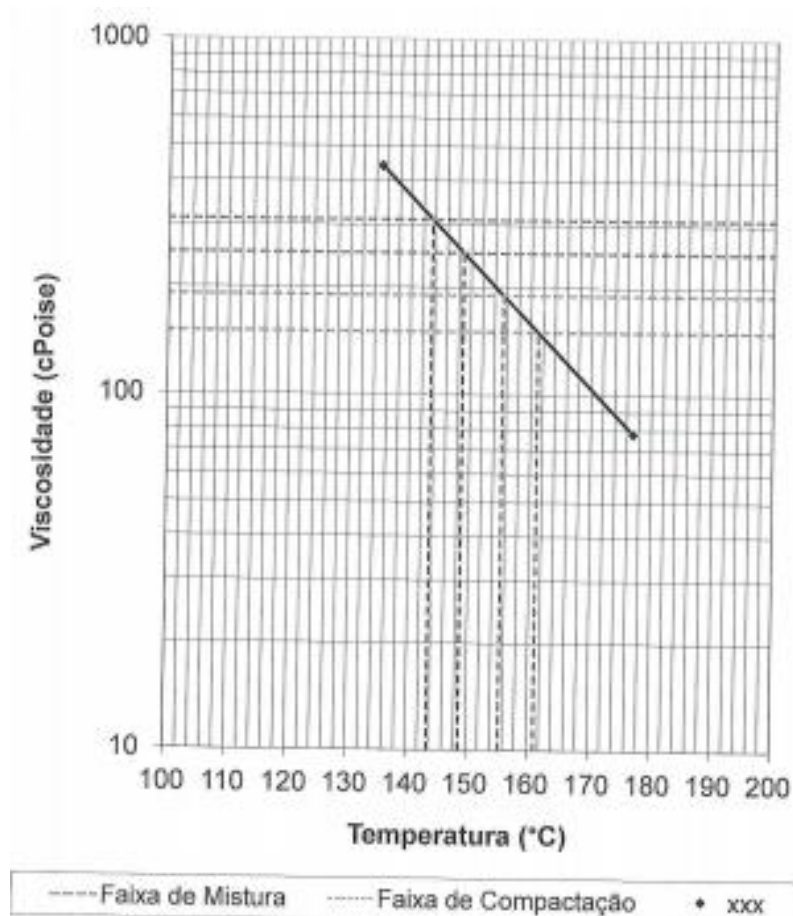


Figura 3.12- Determinação das Temperaturas de mistura e Compactação para Misturas Asfálticas, a partir da Viscosidade Brookfield do ligante asfáltico.

3.3.3 Procedimento Superpave

O Laboratório de Pavimentação Avançada da Concessionária Via040, foi beneficiado com a aquisição de equipamentos necessários para a realização de diversos ensaios da metodologia Superpave, possibilitando a execução de análises para pesquisa e capacitação técnica. A Figura 3.13 apresenta o laboratório da Via040 e os equipamentos adquiridos com esse projeto.



(a) Entrada do laboratório de pavimentação.



(b) Estrutura física do laboratório de pavimentação.



(c) Penetrômetro.



(d) Balança Analítica 1.



(e) Forno NCAT.



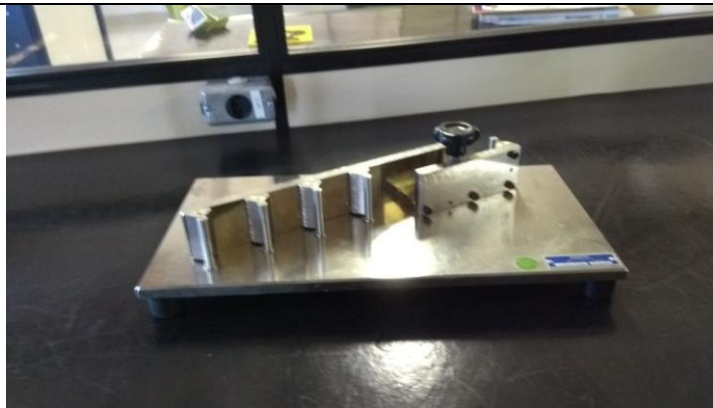
(f) Compactador giratório Superpave.



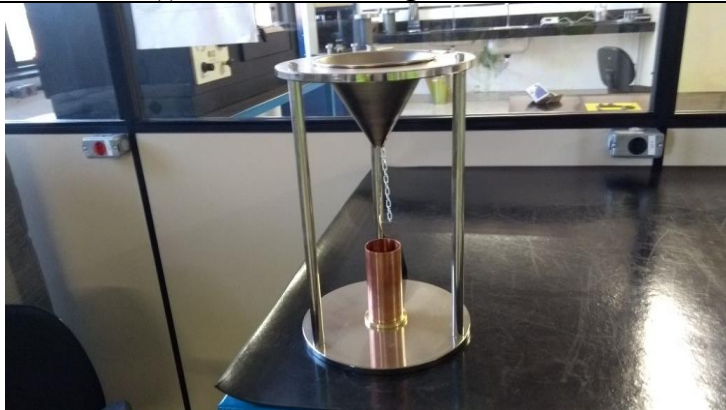
(g) Estufa RTFOT.



(h) Ductilômetro.



(i) Partículas alongadas e achatadas.



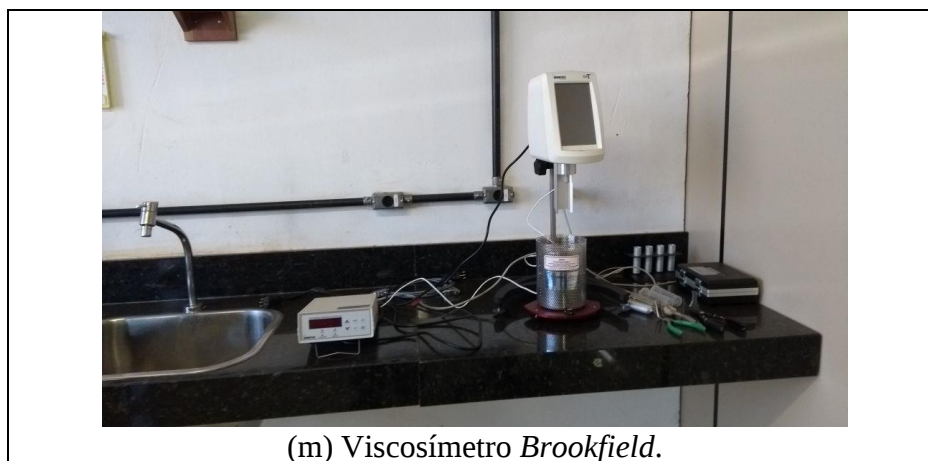
(j) Densidade solta de agregados finos.



(k) Abrasão *Los Angeles*.



(l) Balança Analítica 2.



(m) Viscosímetro *Brookfield*.

Figura 3.13 - Equipamentos adquiridos pelo Projeto de RDT (Via040).

Por se tratarem, em sua maioria, de equipamentos importados, houve uma demora no processo de compra e entrega de alguns desses. Todos os equipamentos e os acessórios necessários para a instalação já se encontram disponíveis no laboratório. Entretanto, para evitar danos físicos dos equipamentos, em especial do CGS, estufa RTFOT e forno NCAT, ocasionados por variações da rede elétrica, e de maneira a assegurar a proteção e a autonomia desses dispositivos, torna-se necessário instalar um no-break e um gerador para o correto funcionamento dessas máquinas, para evitar paradas bruscas dos ensaios, que resultaria em danos irreparáveis em alguns componentes dos equipamentos.

Devido ao processo de importação dos equipamentos adquiridos da metodologia Superpave, e a readequação necessária do laboratório da Via040, nesse trabalho, o processo de dosagem e moldagem dos corpos de prova foram realizados na Universidade Federal de Juiz de Fora- UFJF. Assim a pesquisa possibilitou uma troca de conhecimentos e experiências entre a concessionária e universidade, uma vez que esses estudos tem o caráter e o envolvimento do meio acadêmico.

3.3.4 Dosagem das misturas asfálticas

Com a granulometria escolhida passa-se então à produção das misturas asfálticas. O passo subsequente é a compactação de corpos de prova com um teor experimental para

cada mistura, que é alcançado por meio de estimativas usando-se a densidade efetiva da mistura.

O procedimento Superpave faculta ao projetista escolher qual das três misturas testadas é aquela que melhor atende a todas as exigências volumétricas especificadas para o projeto. No caso da presente pesquisa, como não se busca estudar a melhor mistura e sim verificar o comportamento de todas as misturas, foi obtido um teor estimado para cada mistura.

Para a seleção do teor de projeto de ligante asfáltico, variou-se a quantidade de ligante para o projeto estrutural escolhido do agregado até obter-se propriedades volumétricas e de compactação comparáveis com os critérios de mistura, os quais estão baseados no volume de tráfego e condições ambientais. Assim, para obtenção do Teor de Projeto foram moldados CPs com diferentes teores de ligante, sendo dois CPs para cada teor. Resolveu-se também trabalhar com diferença de 0,5% entre os teores experimentados. A Figura 3.14, ilustra essa etapa.

Dessa forma, atendeu-se também a sugestão da metodologia Superpave que indica 4 teores a serem pesquisados num processo de dosagem: Um próximo ao teor de projeto provável, um teor 0,5% abaixo deste valor, outro 0,5% acima e outro 1% acima do valor provável do teor de projeto. Foram definidos os teores experimentais de 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0% para as misturas de escória 1 e 2 e os teores de 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0% para a mistura convencional.

3.3.5 Compactação dos corpos de prova

Com o teor de ligante escolhido, são moldados corpos de prova e feitas misturas para determinação da densidade teórica máxima (Gmm), ensaio detalhado no item 3.3.6.

De acordo com a curva viscosidade x temperatura traçada para o ligante a ser utilizado, definiu-se a faixa de temperatura adequada para a mistura. As amostras foram submetidas a uma temperatura de 146°C durante 2 horas para simular envelhecimento, e

em seguida, é levada à temperatura de compactação por um tempo e são, então, compactadas.

O número de giros utilizado para a compactação através do Compactador Giratório Superpave é determinado com base no tráfego de projeto sendo estimado um número de giros para compactação inicial (N_{inicial}), de projeto (N_{projeto}) e máxima ($N_{\text{máx}}$), conforme pode ser visto no Quadro 3.4.

ESALs de Projeto	Nível de Compactação			Rodovias Típicas para Aplicação
	N_{inicial}	N_{projeto}	$N_{\text{máx}}$	
$< 3 \times 10^5$	6	50	75	Incluem rodovias com volume de tráfego muito leve tais como rodovias locais, rodovias regionais, avenidas urbanas onde o tráfego pesado é proibido ou permitido a um nível mínimo. O tráfego nestas rodovias seria considerado local a princípio, não regional, estadual ou interestadual. Rodovias de objetivos especiais servindo a áreas ou locais de recreação também são aplicáveis a este nível.
3×10^5 a 3×10^6	7	75	115	Incluem muitas rodovias coletoras ou estradas de acesso. Avenidas urbanas com tráfego médio e a maioria das rodovias regionais podem ser aplicáveis neste nível.
3×10^6 a 3×10^7	8	100	160	Incluem muitas rodovias de pista dupla, múltiplas-pistas e rodovias de acesso parcialmente ou completamente controlado. Dentre estas aplicações estão as avenidas urbanas de tráfego médio a pesado, muitas rodovias estaduais, federais e algumas interestaduais rurais.
$> 3 \times 10^7$	9	125	205	Incluem a grande maioria do sistema interestadual americano, tanto rural quanto urbano. Aplicações especiais tais como estações de pesagem ou pistas de subida de caminhões em rodovias de pista dupla também podem ser aplicáveis a este nível.

Quadro 3.4- Esforço de Compactação para o Compactador Giratório.
Fonte: AASHTO PP28, 2001.

Para estas análises, adotou-se um tráfego de 3×10^6 a 3×10^7 , o qual segundo o Quadro 3.4, engloba as “rodovias de pista dupla, múltiplas-pistas e rodovias de acesso parcialmente ou completamente controlado, além de avenidas urbanas de tráfego médio e pesado, rodovias estaduais, federais e algumas interestaduais rurais”. Ainda conforme o quadro anterior, adotou-se para o nível de compactação:

$N_{\text{inicial}} = 8$ giros;

$N_{projeto} = 100$ giros;

$N_{máximo} = 160$ giros;

A Figura 3.14, ilustra etapas do processo de moldagem dos corpos de provas.



(a) Aquecimento dos Agregados.



(b) Pesagem do ligante.



(c) Preparação da mistura à quente do Ligante-Agregado.



(d) Colocação da mistura no molde.



(e) Compactador giratório do tipo SUPERPAVE empregado neste estudo



(f) Corpo de prova moldado no CGS.



(g) Corpos de prova moldados.

Figura 3.14- Etapas do processo realizado para a compactação dos corpos de provas.

3.3.6 Cálculo dos parâmetros volumétricos das misturas

Essa etapa, tem a finalidade de efetuar os cálculos referentes às propriedades volumétricas tendo como base as propriedades de projeto especificadas no método Superpave (Bernucci *et al.*, 2007).

Então, das misturas experimentais, obtêm-se as propriedades volumétricas após a compactação dos corpos de prova no compactador giratório com o número de giros de projeto. Para a obtenção desses parâmetros, os corpos de prova tiveram suas dimensões

registradas e foram submetidos à pesagem ao ar e nas condições imersa e de superfície seca saturada.

A premissa fundamental do projeto de misturas Superpave, de nível 1, é que a quantidade de ligante usada deve ser tal que a mistura atinja 4% de vazios (V_a) no número de giros de projeto (N_{proj}). Acaso isto não ocorra nesta mistura experimental, realiza-se uma estimativa a partir de fórmulas empíricas para saber qual o teor de ligante precisará ser empregado para se atingir os 4% de vazios. Além disso, são avaliadas as relações de % de vazios no agregado mineral (VMA ou VMA) e a % de vazios preenchidos com asfalto (RBV), denominado também como VFA. Essas relações, são obtidas com as Equações 3.3 a 3.5.

$$V_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \times 100 \quad (3.3)$$

$$VAM = 100 - \frac{(G_{mb} \times P_s)}{G_{sb}} \quad (3.4)$$

$$VFA = \frac{(VMA - V_a)}{VMA} \times 100 \quad (3.5)$$

Onde:

G_{mb} = Densidade Aparente da Mistura;

G_{mm} = Densidade máxima teórica;

G_{sb} = Densidade aparente dos agregados;

P_s = Teor de Agregados;

VMA = Vazios no Agregado Mineral.

Va = Teor de Vazios;

VFA = Vazios preenchidos por asfalto;

- **Determinação da densidade das misturas asfálticas**

- a) **Densidade aparente da mistura**

A densidade aparente, G_{mb} , é determinada através da Equação 3.6, mostrada na ASTM D 2726-00. Assim, tem-se que:

$$G_{mb} = \frac{W_d}{W_{ssd} - W_{sub}} \quad (3.6)$$

Em que:

G_{mb} = Massa específica aparente da mistura (g cm^{-3});

W_d = peso ao ar ou peso seco (g);

W_{ssd} = peso medido na condição saturada de superfície seca (g);

W_{sub} = peso medido na condição saturada imerso em água (g).

Ou, conforme a Equação 3.7, tem-se que:

$$D_a = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_{imerso}} \quad (3.7)$$

Onde:

P_{ar} = Peso do Corpo de Prova no Ar (g);

P_{imerso} = Peso do Corpo de Prova Imerso em Água (g);

A Figura 3.15 ilustra parte da sequência executiva deste ensaio.

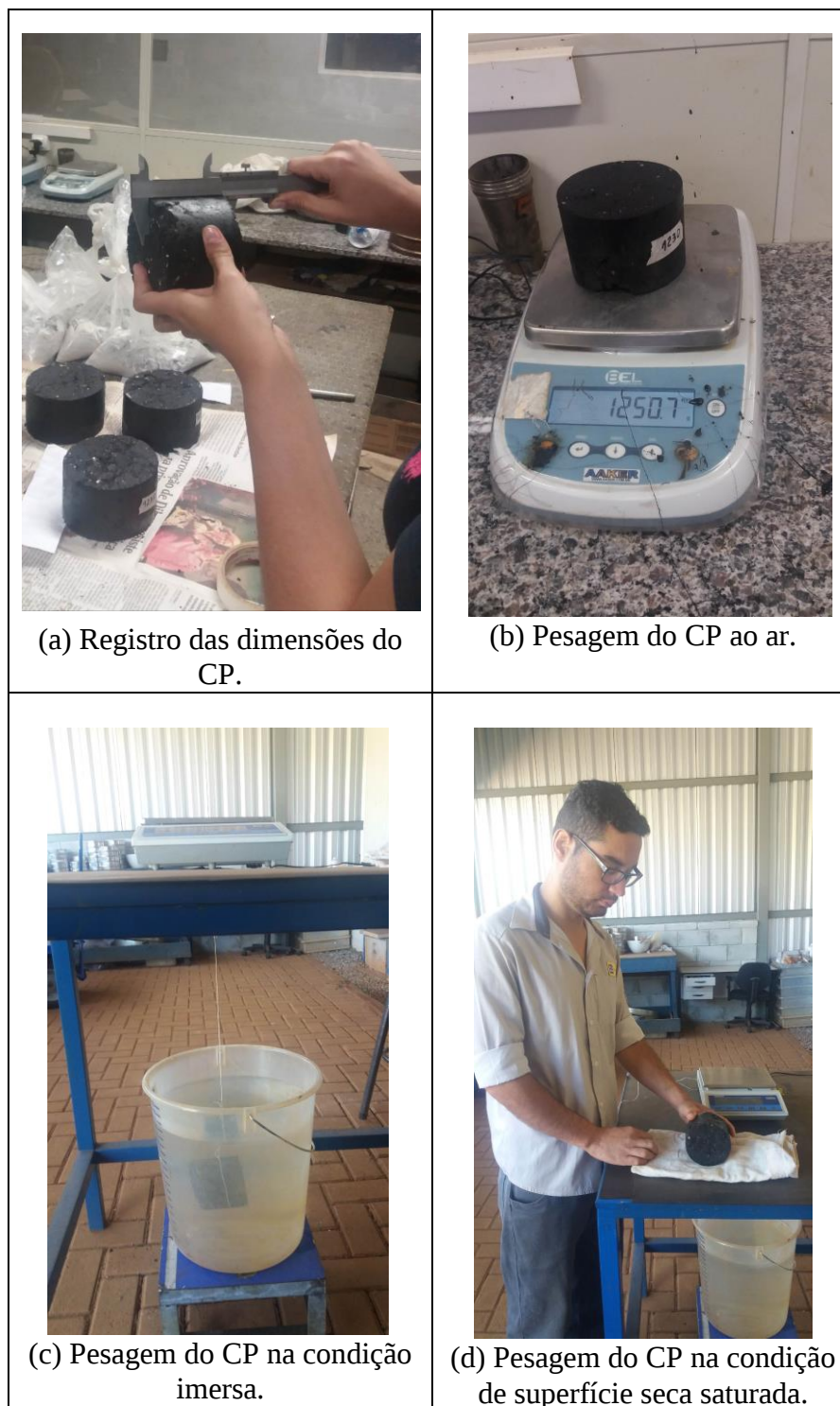


Figura 3.15 - Etapas de registro das dimensões e pensagens dos corpos de prova.

b) Densidade máxima medida da mistura, através do Método Rice

O método Rice permite determinar a massa específica máxima medida e a densidade da mistura asfáltica não compactada a 25°C, denominada como Gmm. Essa massa específica máxima é empregada no cálculo dos vazios de ar na mistura asfáltica compactada, no cálculo da quantidade de ligante absorvido pelo agregado, e também, fornece valores de projeto para compactação das misturas asfálticas.

O ensaio foi realizado em conformidade com a norma americana ASTM D 2041 (2000). Sendo executado com amostras das três misturas asfálticas produzidas em todos os teores de ligante testados na determinação do teor de projeto de ligante. Para realização desse ensaio, a mistura asfáltica, em temperatura ambiente, é colocada em um kitassato de massa conhecida e coberta com água. Aplica-se nesse sistema uma pressão de vácuo para que seja retirado o ar entre os agregados cobertos por ligante na mistura, durante aproximadamente 15 minutos e, após, o recipiente volta à pressão ambiente e é completo com água e pesado. A Gmm é calculada através da Equação 3.8.

$$Gmm = \frac{A}{(A + B - C)} \quad (3.8)$$

Onde:

A= massa da amostra seca em ar (g);

B= massa do recipiente com volume completo com água (g);

C= massa do recipiente + amostra submersa em água (g).

A Figura 3.16, mostra algumas etapas do ensaio RICE.



Figura 3.16 – Determinação do Gmm, etapas do ensaio RICE.

c) Densidade Máxima Teórica

A densidade máxima teórica, é um parâmetro importante, pois é determinado em função das densidades relativas reais dos componentes da mistura asfáltica como os agregados, grãos e miúdos, e na mistura total. E, é dada pela fórmula da Equação 3.9.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%b}{Db} + \frac{\%Ag}{Dag} + \frac{\%Am}{Dam} + \frac{\%f}{Df}} \quad (3.9)$$

Onde:

DMT = densidade máxima teórica (g cm⁻³);

%b = percentagem de asfalto (CAP) em relação à massa total da mistura;

%Ag, %Am e %f = percentagens de agregado graúdo, miúdo e fíler, respectivamente, em relação à massa total da mistura;

Db, DAg, DAm, Df = massas específicas reais do asfalto (CAP), do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler, respectivamente (g.cm⁻³).

- **Demais Parâmetros**

Para a estimativa da absorção de ligante, foi empregado a Equação 3.10, dependente da Equação 3.11.

$$\%Pbe = 100 \times Gb \times \frac{Gse - Gsb}{Gsb \times Gse} \quad (3.10)$$

Onde:

Pbe = Percentual de ligante efetiva;

Gb = Densidade do ligante asfáltico;

Gsb = Densidade aparente dos agregados;

Gse = Densidade efetiva dos agregados;

O G_{se} , densidade efetiva dos agregados, é a correlação entre a massa dos agregados eliminando vazios permeáveis e o seu volume. E é expressa pela Equação 3.11.

$$G_{se} = \frac{1 - P_b}{\frac{1}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (3.11)$$

Sendo:

P_b = Teor de ligante utilizado;

G_{mm} = Densidade máxima teórica.

Outro importante requisito de mistura é o teor de fíler. Este é calculado como a razão entre a porcentagem em peso do agregado mais fino do que a peneira de 0,075 mm pelo teor efetivo de asfalto expresso como porcentagem do peso total da mistura. O teor efetivo de asfalto é o ligante total menos o absorvido, e é usado na fase de projeto e um teor aceitável deste varia entre 0,6 e 1,2 para qualquer tipo de misturas.

3.4 Ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas

Posteriormente, foram realizados ensaios para determinação de características mecânicas dessas misturas em estudo. Essa caracterização compreende ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral, conforme Tabela 3.2, com a finalidade de comparar as três misturas dosadas.

Tabela 3.2- Quantidade de amostras utilizadas para caracterização mecânica das misturas

Mistura	Ensaio Mecânico			Total de Amostras
	MR	RT	Fadiga	
E1	3	3	6	12
E2	3	3	6	12
C	3	3	6	12
TOTAL	9	9	18	36

Após todos os ensaios realizados, tem-se a etapa que consistirá na análise dos resultados obtidos na etapa experimental, permitindo avaliar a viabilidade técnica do uso de escória de ferroliga de manganês como agregado para misturas asfálticas tipo concreto asfáltico. Essa fase, possibilitará a comparação dos parâmetros volumétricos (dosagem Superpave) e mecânicos das misturas confeccionadas com a escória de ferroliga como agregado com uma mistura feita com agregados pétreos convencionais.

3.4.1 Resistência à Tração Estática por Compressão Diametral

O ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral (RT), também denominado como “ensaio brasileiro”, foi elaborado inicialmente pelo professor Lobo Carneiro, em 1943 (Carneiro, 1943), com o intuito de definir de maneira indireta a resistência à tração de corpos de prova de concreto de cimento *Portland* por solicitações estáticas. Depois, o método foi adaptado para a caracterização de misturas asfálticas com o emprego de frisos metálicos curvos (Falcão e Soares, 2002; Bernucci *et al*, 2008).

Sua execução foi realizada segundo a norma DNER-ME 138/94, e consiste basicamente na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas forças concentradas diametralmente opostas no corpo de prova cilíndrico. Sendo esse realizado a temperatura de 25°C, em uma prensa *Marshall*, empregando uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, o que gera um estado de tensão de tração biaxial

sucedendo a ruptura do CP, segundo o plano diametral vertical. O ensaio de RT é ilustrado na Figura 3.17.

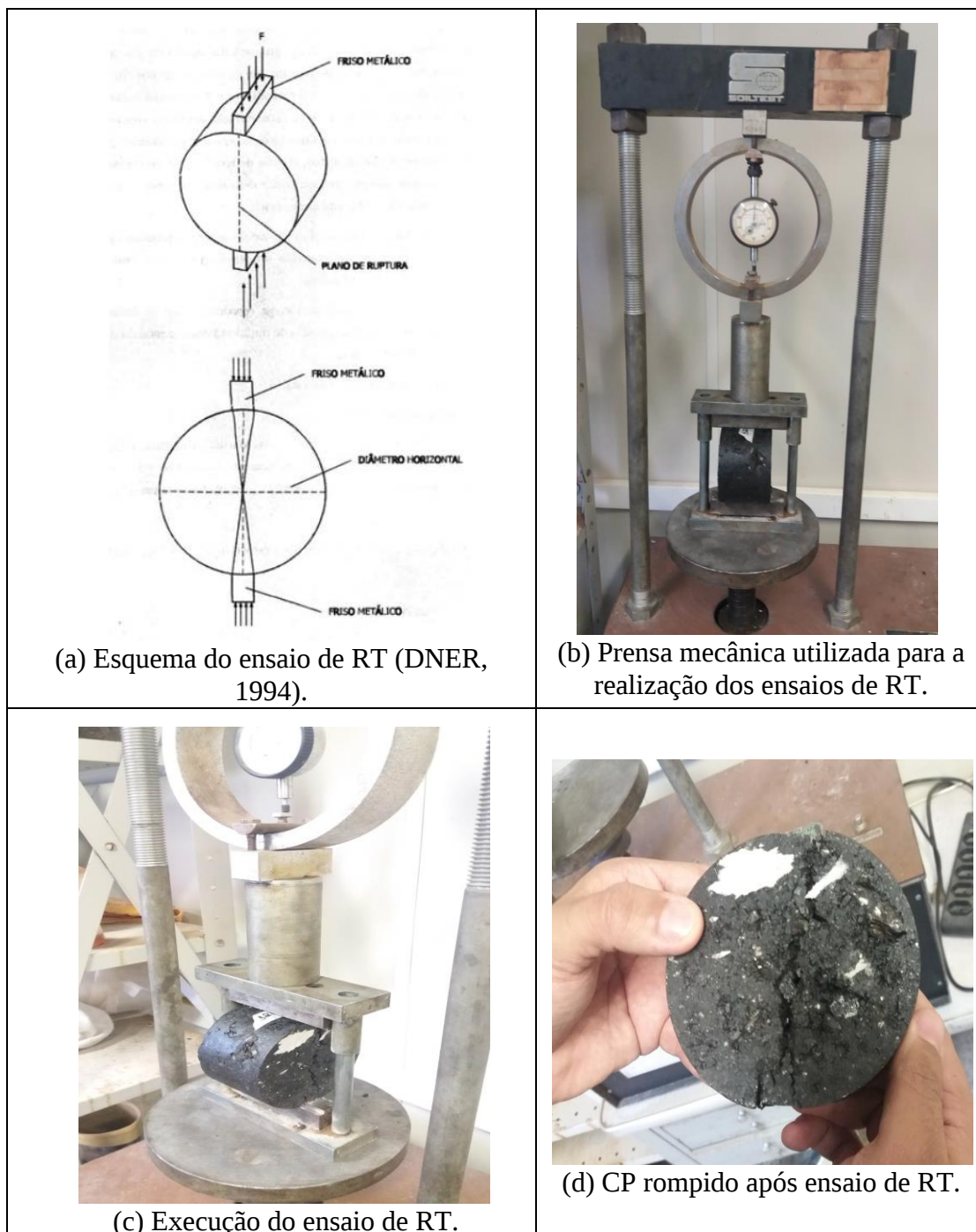


Figura 3.17- Esquema do ensaio de Resistência à Tração indireta (RT) e equipamento utilizado.

Com o valor de carga de ruptura (F) obtido, calcula-se a resistência à tração do CP, através da expressão (Equação 3.12):

$$RT = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (3.12)$$

Sendo,

RT= resistência à tração (kg/cm²);

F= carga de ruptura (kg);

D= diâmetro do CP, (cm);

H= altura do CP, (cm).

Alguns autores discorrem a relação MR/RT como um parâmetro de comparação entre misturas no que se diz respeito ao comportamento a fadiga. Pinheiro *et al* (2003) e Leite *et al* (2000) indicam que misturas que possuem uma relação MR/RT da ordem de 3000 apresentam um bom comportamento estrutural, ou seja, são flexíveis ao mesmo tempo em que apresentam boa resistência à tração. Assim sendo, para uma mesma RT, uma relação MR/RT menor é uma vantagem, pois possibilita o uso de camadas menos espessas para uma mesma vida de fadiga .

3.4.2 Módulo de Resiliência por Compressão Diametral

O Módulo de Resiliência expressa a relação da tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical do corpo de prova com a deformação de tração recuperável correspondente, a uma determinada temperatura. Dado pela Equação 3.12.

$$MR = \frac{\sigma_t}{\epsilon_r} \quad (3.12)$$

Onde:

MR= Módulo de Resiliência.

σ_t =Tensão de Tração.

ϵ_r = Deformação específica vertical resiliente ou recuperável.

Esse ensaio para obtenção do módulo de resiliência em misturas asfálticas é preconizado pela especificação do DNIT-DNER-ME 133/94 (DNIT, 1994), e consiste em solicitar o corpo de prova dinamicamente por uma carga repetida no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico. Tal carga, causa uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga, e é então, medido a deformação resiliente, ou deslocamento diametral, ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular à carga aplicada.

Assim, a execução desse teste foi realizada no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia/UFJF, em uma câmara climática a uma temperatura de 25 °C, conforme indicado na Figura 3.18.



(a) Equipamento CD do Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia/UFJF, utilizado para o ensaio de MR.



(b) Configuração do CP e do LVDT.

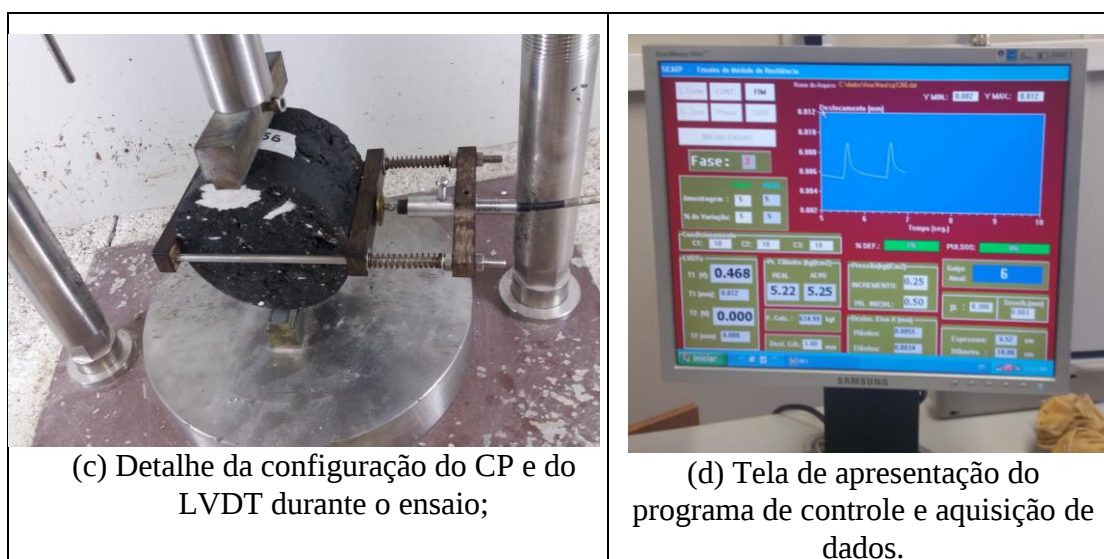


Figura 3.18 - Ensaio Módulo de Resiliência por Compressão Diametral.

As amostras foram submetidas a compressão diametral distribuída ao longo de duas geratrizes opostas através de frisos curvos de carga, com aplicação de carga dinâmica durante 0,1 s e repouso de 0,9 s, frequência de 1 Hz. A carga pulsante tem como finalidade simular a passagem da roda dos veículos no revestimento asfáltico.

A Figura 3.19, esquematiza o carregamento no ensaio de módulo de resiliência.

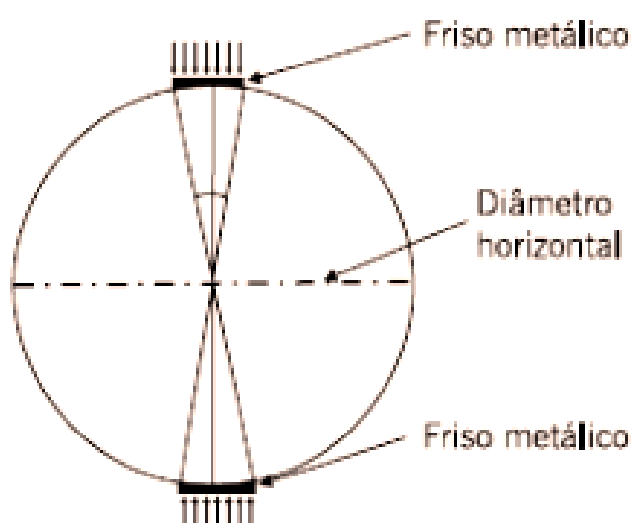


Figura 3.19- Esquema do ensaio de compressão diametral.
Fonte: Bernucci *et al*, 2008.

A relevância em realizar esse ensaio deve-se ao fato de que o mesmo é empregado, no Brasil, para o cálculo de tensões e deformações nos pavimentos e futuro dimensionamento dos mesmos.

3.4.3 Fadiga por compressão diametral a tensão controlada

A vida de fadiga de um material é definida como o número de repetições de uma carga, capaz de promover ruptura de um corpo de prova, sendo esta carga inferior à resistência estática do material. Segundo Medina e Motta (2005), a fadiga pode ser explicada como sendo uma etapa de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva de um material submetido a um estado de carregamento e deformações repetidas, acarretando na diminuição da resistência e no aparecimento de trincas ou fraturas após um número suficiente de repetições de carga com amplitudes inferiores a resistência a tração do material.

Esse ensaio foi realizado no mesmo equipamento utilizado para o ensaio de MR, também com temperatura controlada. De acordo com Medina (1997), a carga aplicada deve induzir tensões normais horizontais de 10,0% a 50,0% do valor de RT, tendo duração de 0,1 s e descanso de 0,9 s. As amostras desse estudo, foram submetidas a um nível de tensão que variou de 40 a 15% do valor da RT, para as misturas escória 1 e convencional, e de 35% a 10% para a mistura escória 2.

No Brasil, o ensaio de fadiga a tensão controlada por compressão diametral é adotado com maior frequência por ser um ensaio simples e fácil de ser realizado quando comparado ao de deformação controlada. Para a deformação controlada, o carregamento decresce durante o ensaio, mantendo constantes as deformações sofridas pela amostra, sendo o critério de vida de fadiga determinado como o número de repetições de cargas necessário para diminuir a rigidez do material ao um valor prefixado (Pinto, 1991).

Já no ensaio de fadiga a tensão controlada por compressão diametral, o corpo de prova é submetido à cargas repetidas e as deformações resultantes crescem

gradativamente até a fase de fratura completa do corpo de prova. A vida de fadiga (N) do material pode ser determinada como o número total de aplicações de carga que levam o corpo de prova a uma ruptura estrutural (Pinto, 1991; Pinto e Preussler, 2002), sendo expressas pelas Equações 3.13 e 3.14.

$$N = K \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (3.13)$$

$$N = K1 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{k2} \quad (3.14)$$

Onde:

N = vida de fadiga;

ε_i = deformação específica resiliente inicial;

$\Delta\sigma$ = diferença entre as tensões de compressão e tração no centro da amostra;

K, n = constantes determinadas experimentalmente, em escalas logarítmicas.

O ensaio é de suma importância, visto que a maioria dos defeitos encontrados nos pavimentos brasileiros é devido ao fenômeno da fadiga (Pinto, 1991; Medina, 1997). Assim o ensaio, que tem como intuito simular a passagem de roda de um veículo no pavimento, é o que melhor retrata as condições de carregamento que ocorrem nas estruturas de pavimentos.

Como resultado final deste ensaio, tem-se um gráfico do tipo log-log entre o número de aplicações de carga (N) e a diferença entre a tensão máxima horizontal e vertical no centro do CP ($\Delta\sigma$), de acordo com a Equação 3.15, para obtenção da curva de vida de fadiga da mistura.

$$\Delta\sigma = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (3.15)$$

Essa curva de vida de fadiga ainda pode ser elaborada em função da deformação específica resiliente inicial (ε_i) *versus* o número de repetições de carga (N), conforme Equação 3.16.

$$\varepsilon_i = \frac{\%RT}{MR} \quad (3.16)$$

A Figura 3.20, mostra um esquema da diferença de tensões no centro da amostra e o posicionamento do cp para a realização do ensaio na prensa de compressão diametral de ensaios dinâmicos.

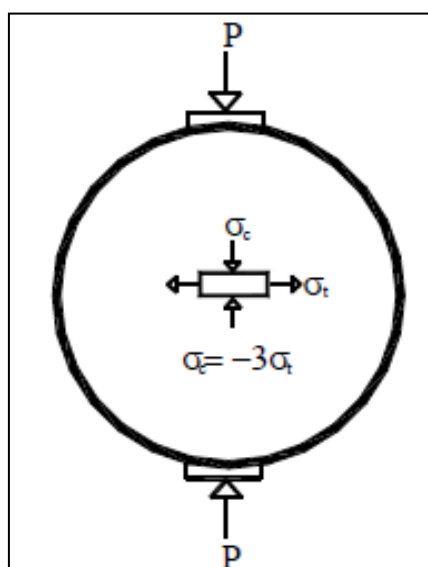
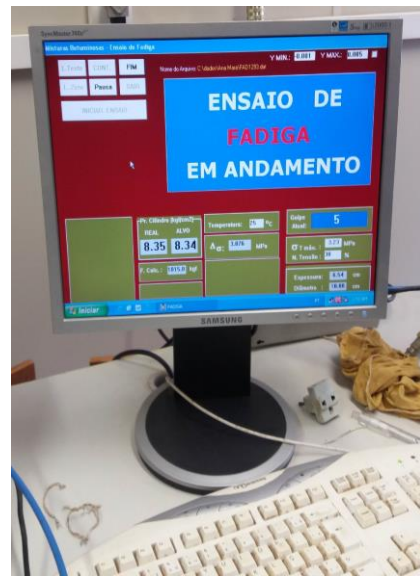


Figura 3.20- Esquema $\Delta\sigma$ no centro da amostra.
Fonte: Pinto, 1991; Medina, 1997.

O ensaio realizado é mostrado pela Figura 3.21.



(a) Colocação do CP para realização do ensaio;



(b) Tela de apresentação do programa de controle e aquisição de dados.



(c) cetalhe do CP durante o ensaio de fadiga.



(d) Detalhe do CP quase no final do ensaio de fadiga.

Figura 3.21 – Ensaio de Fadiga por compressão diametral a tensão controlada.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização dos agregados

4.1.1 Ensaios Físicos

Os ensaios de granulometria dos agregados, convencionais e siderúrgicos, dessa mistura foram realizados segundo as especificações da norma DNER 083/98. O Quadro 4.1 apresenta as granulometrias desses agregados, e, a Figura 4.1 ilustra suas curvas granulométricas.

Quadro 4.1 – Granulometria em % de peso passante dos agregados.

Peneira		Porcentagem Passante (%)					
Pol	mm	Pó de Pedra	Areia	Brita 1	Brita 0	Escória 1	Escória 0
3 pol	76,2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2 pol	50,8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2 pol	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1 pol	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4 pol	19,1	100,00	100,00	97,29	100,00	78,15	100,00
1/2 pol	12,7	100,00	100,00	36,02	100,00	34,47	99,99
3/8 pol	9,5	100,00	100,00	5,14	75,60	13,62	71,12
nº 4	4,8	99,58	99,35	0,08	12,86	2,15	42,95
nº 8	2,4	74,52	97,33	0,00	2,65	1,01	7,85
nº 10	2	68,07	96,47	0,00	1,99	0,99	5,31
nº 16	1,2	52,23	89,12	0,00	1,99	0,94	3,56
nº 30	0,6	39,70	66,28	0,00	1,99	0,89	2,17
nº 40	0,42	35,00	43,95	0,00	1,99	0,85	1,71
nº 50	0,3	31,20	18,80	0,00	1,99	0,68	1,25
nº 80	0,18	28,07	8,21	0,00	1,99	0,52	0,79
nº 100	0,15	25,54	3,46	0,00	1,99	0,32	0,37
nº 200	0,074	7,41	0,58	0,00	0,00	0,16	0,00

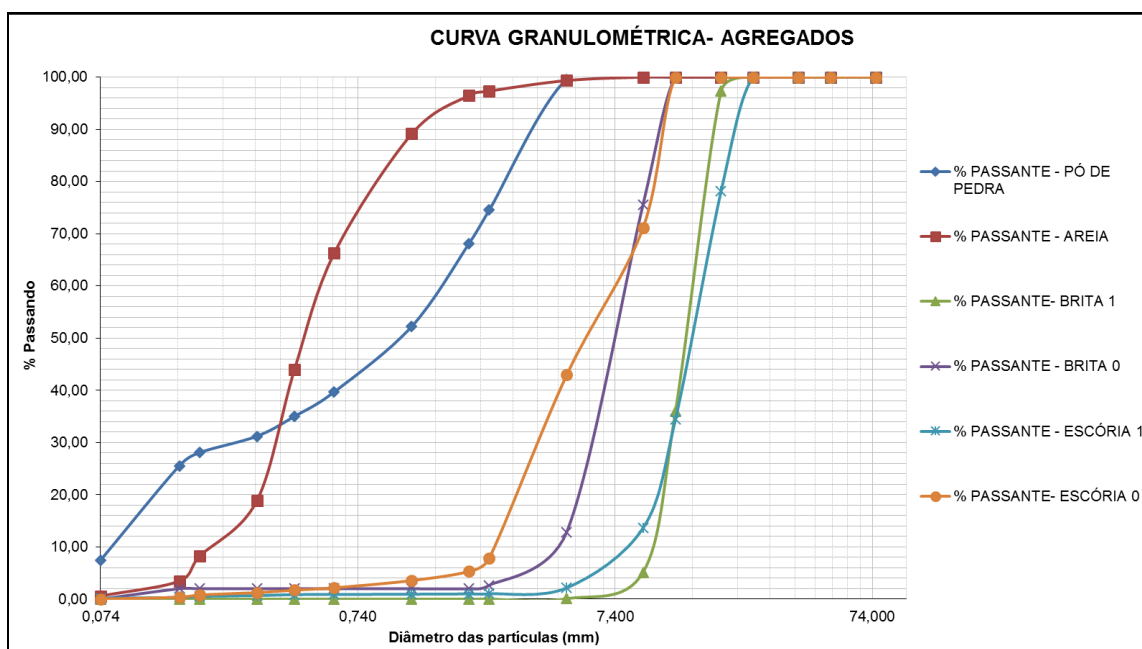


Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados.

Com base nos resultados do Quadro 4.1 e da Figura 4.1, é possível verificar que as distribuições granulométricas das amostras dos materiais convencionais e siderúrgicos são bem semelhantes, o que garante a homogeneidade do material, pelo menos no que diz respeito a esse parâmetro. Nota-se que, a composição granulométrica da escória 1 e da brita 1 se assemelham, exibindo uma pequena quantidade de finos. Da mesma forma, a escória 0 e a brita 0 apresentam composições granulométricas similares.

Em todos os materiais (brita 1, brita 0, escórias, pó de pedra e areia) foram realizados ensaios de caracterização. Na tabela 4.1, são mostradas as respostas das principais características avaliadas dos agregados usados nesse estudo.

Tabela 4.1 – Resumo dos Resultados dos Ensaios de Caracterização dos Agregados.

Parâmetros	Unidade	Material					
		Pó de Pedra	Areia	Brita 0	Brita 1	Escória 1	Escória 0
Massa Específica Real (Gsa)	g/cm ³	2,68	2,62	2,52	2,57	3,1	3,14
Massa Específica Aparente(Gsb)	g/cm ³	-	-	2,47	2,51	3,03	3,05
Massa Unitária	kg/dm ³	-	-	1,43		1,60	
Abrasão Los Angeles	%	-	-	34,92	29,33	12,96	14,18
Índice de Forma	%	-	-	2,98	2,12	2,17	2,66
Absorção	%	-	-	0,78	0,86	0,73	1
Durabilidade	%	-	-	2,51	1,81	6,48	1,84
Adesividade	-	-	-	Satisf.	Satisf.	Satisf.	Satisf.

Os resultados do ensaio de densidade aparente e densidade real da escória de FeSiMn, foram superiores aos valores encontrados para o agregado convencional gnaisse, esse valor superior é devido a sua estrutura física de elevada densidade. Nota-se também, que as densidades da escória 1 e da escória 0 apresentaram valores muito próximos uma vez que as escórias possuem a mesma formação e uma única pilha de estocagem, diferindo apenas em sua granulometria.

Com base nas condições específicas para aplicação da escória em pavimentos rodoviários, a massa específica se enquadra dentro dos limites normativos da DNER-EM 262/94, referente a escória de aciaria, e excede 0,1 g/cm³ segundo a DNER-EM 260/94 para a escória de alto-forno.

Analisando a absorção, o valor encontrado para a escória em estudo foi de, 0,73% e 1% para a escória 1 e escória 0, respectivamente. Ressalta-se que esse número encontrado para absorção da escória se enquadra tanto para a DNER-EM 260/94, quanto para a DNER-EM 262/94, para aplicação em pavimentos rodoviários, e ainda conforme Silva *et al.* (1988), no que se menciona à escória de ferroliga.

Com relação ao índice de forma das partículas, os valores obtidos estão bem acima do encontrado na literatura para esse tipo de agregado, Silva *et al.* (2002) encontraram 0,74 para a escória. A norma DNER – ES 313 (1997) estabelece um limite de 0,50 para agregados graúdos e o critério estabelecido pelo DNIT é de $f \geq 0,5$ para aceitação dos

agregados, Posteriormente, é interessante que sejam realizados ensaios de partículas chatas e alongadas e angulosidade de agregados finos, sugeridos pelo método Superpave.

Os valores de abrasão *Los Angeles* da escória foram adquiridos a partir da média aritmética de três ensaios, para cada graduação. Uma vez que não há uma especificação para o uso de escória de ferroliga em pavimentação, considerou-se o limite máximo de 35% para o desgaste por abrasão *Los Angeles* conforme recomendado por Silva *et al.* (1988), verificando que as escórias apresentaram resultados inferiores a essa definição. E que os agregados convencionais também atendem as especificações do DNIT 031/2004 – ES, que indica um desgaste máximo de 40% para agregados graúdos, para uso em CBUQ. Destacando que, o desgaste sofrido pelo agregado convencional foi bem superior ao do agregado siderúrgico, reforçando a elevada resistência mecânica e a abrasão da escória, conforme exposto em literaturas.

Na avaliação da durabilidade, empregando-se a solução de sulfato de sódio por meio do método DNER ME 089/94, tem-se que as durabilidades de ambos foram consideradas satisfatórias, a perda média apresentada pela escória foi de 4,31% para a escória 1 e de 1,84% para a escória 0, como não há especificação para o uso da escória de ferroliga, adotou-se conforme o trabalho de Silva *et al.* (1988), que a escória de ferroliga para uso em pavimentação deve atender ao limite máximo de 5,0%; valor esse admitido, segundo o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1994), para a escória de aciaria. A brita convencional, de graduação 1 e 0, apresentou resultados de durabilidade de 1,81% e 2,51%, respectivamente, indicando possuir maior resistência ao ataque químico se comparado à escória de FeSiMn.

A massa unitária da escória exibiu valores superiores à massa unitária encontrada para o agregado convencional, sendo essa de 1,60kg/dm³ para a escória e de 1,43kg/dm³ para a brita convencional, isso significa que uma maior quantidade de material será necessária para ocupar um mesmo volume transportado. Segundo o DNER (1994), a massa unitária da escória para uso em pavimentação deve enquadrar-se entre 1,5 a 1,7 kg/dm³, estando a escória em estudo em conformidade.

Ainda, foram executados ensaios para verificação da adesividade ao ligante asfáltico, conforme institui o DNER ME 078/94, que trata de um ensaio qualitativo para

Já para as espécies químicas compostas foram em porcentagem em massa, os seguintes valores: $\text{SiO}_2 = 13,90$; $\text{MnO} = 43,15$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 8,20$; $\text{CaO} = 10,90$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 8,90$; $\text{K}_2\text{O} = 7,90$; $\text{SO}_3 = 0,12$; $\text{Tb}_4\text{O}_7 = 1,08$; $\text{BaO} = 0,00$; $\text{SrO} = 0,19$.

Para o uso em camada de pavimento, deve-se ter uma porcentagem de óxido de cálcio (CaO) menor do que 45% e um somatório de óxidos de alumínio (Al_2O_3) e de ferro (Fe_2O_3 e FeO) inferior a 30% (Arema, 2001). A análise química da escória de Ferro Silício-Manganês mostrou que a maior porcentagem de óxido de cálcio (CaO) encontrada por ponto foi de 10,90%, e o somatório de óxidos de alumínio (Al_2O_3) e de ferro (Fe_2O_3) foram de 17,10%, provando que os resultados encontrados ficaram abaixo dos valores recomendados pela Arema (2001).

Com a microscopia eletrônica de varredura (MEV), pode-se observar e caracterizar as diferentes fases minerais existentes, Figura 4.3. Ao contrário dos ensaios químicos realizados anteriormente, esse ensaio é realizado pontualmente.

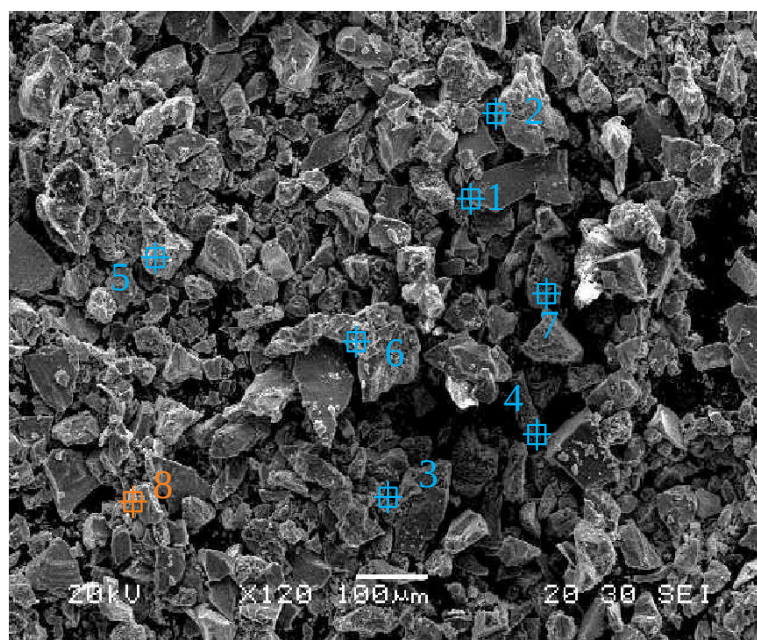


Figura 4.3 - Detalhe dos pontos analisados.

A partir desses pontos, os resultados encontrados foram conforme gráfico da Figura 4.4.

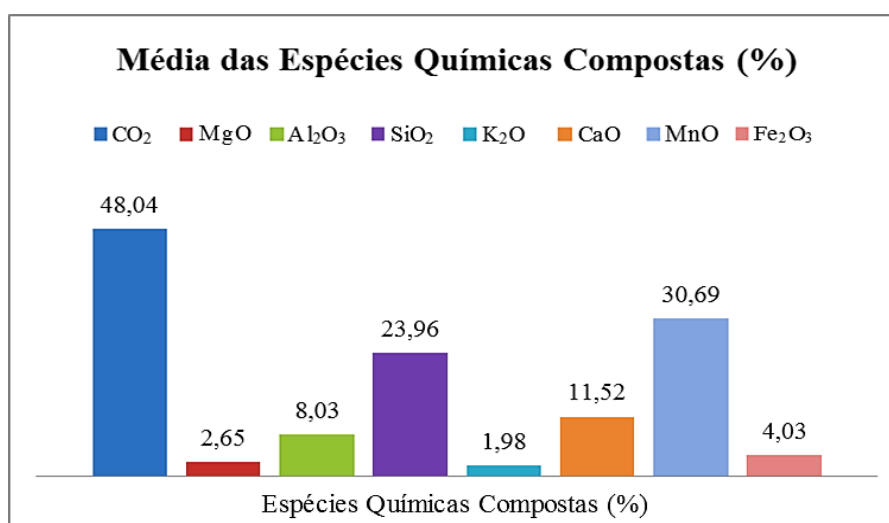


Figura 4.4 - Gráfico da Média das Espécies Químicas Compostas (%).

Os resultados encontrados sistematizados na Figura 4.4 mostram que, nos pontos analisados, os teores de óxido de carbono, óxido de silício, óxido de cálcio e óxido de manganês apresentaram maiores porcentagens, sendo que, o óxido de carbono apresentou entre todos os elementos, a maior porcentagem. A análise da escória de ferro silício-manganês mostrou que os resultados encontrados ficaram abaixo dos valores recomendados pela Arema (2001).

A escória de ferro silício-manganês, em análise, apresentou resultado médio de 0,08 % de cal livre em um total de 30 ensaios. Os resultados evidenciam que as porcentagens de cal livre encontradas na escória são muito baixas, o que caracteriza um material com pouca expansão, o que a credencia para o uso estudado. Os valores encontrados demonstram um valor pequeno provando que tem menos de 1% de cal livre, sendo que a norma prescreve um limite máximo de 3% de cal livre.

Considerando as análises ambientais, os critérios medidos nos ensaios de Lixiviação para o ensaio de Toxicidade com parâmetros inorgânicos (separação de certas substâncias inorgânicas contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação) são apresentados na Quadro 4.2.

Quadro 4.2- Classificação de toxicidade por lixiviação.

Parâmetros	Método Analítico	Limites da Norma NBR10004:2004 (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado Amostra (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado Duplicada (mg/L)
Arsênio - As	SMEWW 3114-B	1	<0,01	<0,01
Bário - BA	SMEWW 3030, 3120-B	70	1,43	0,75
Cádmio - Cd	SMEWW 3030, 3120-B	0,5	<0,001	<0,001
Chumbo - Pb	SMEWW 3030, 3120-B	1	0,03	0,03
Cromo Total - Cr	SMEWW 3030, 3120-B	5	<0,01	<0,01
Fluoreto - F	SMEWW 4500F-C	150	1,89	0,24
Mercúrio- Hg	SMEWW 3112-B	0,1	<0,0002	<0,0002
Prata - Ag	SMEWW 3030, 3120-B	5	0,01	0,02
Selênio - Se	SMEWW 3114-B	1	<0,01	<0,01

De acordo com os resultados do Quadro 4.2, acima, o resíduo originário da amostra ensaiada não é corrosivo, por não apresentar características corrosivas, segundo item 4.2.1.2 subitem (a), da norma NBR10004 (2004). E não é reativo, por não apresentar características reativas, segundo item 4.2.1.3 subitens (a, b, c, e), da norma NBR10004 (2004). Todas as substâncias ficaram dentro dos limites prescritos pela norma NBR10004 (2004). Portanto, a escória é classificada como Classe II não perigoso.

Os resultados obtidos nos procedimentos de Solubilização para ensaio de Toxicidade com parâmetros inorgânicos (realização de análise química em amostra representativa do resíduo, depois de dissolvido em água deionizada ou destilada e depois filtrado) encontram-se listados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3- Classificação de toxicidade por solubilização.

Parâmetros	Método Analítico	Limites da Norma NBR10004/2004 (mg/LIn) orgânicos	Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/L)	Concentração no Resíduo Solubilizado Duplicada (mg/L)
Alumínio (mg Al/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,2	3,15	4,05
Arsênio (mg As/L)	SMEWW 3114-B	0,01	<0,01	<0,01
Bário (mg Ba/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,7	0,05	0,03
Cádmio (mg Cd/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,005	<0,001	<0,001
Cianeto (mg CN/L)	SMEWW4500CN-B, C	0,07	<0,01	<0,01
Cobre (mg Cu/L)	SMEWW 3030,3120-B	2	<0,008	<0,008
Chumbo (mg Pb/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,01	0,01	<0,01
Cloreto (mg Cl/L)	SMEWW 4500Cl-B	250	10,1	10,3
Cromo Tot. (mg Cr/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,05	<0,01	<0,01
Ferro (mg Fe/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,3	<0,1	<0,1
Fluoreto (mg F/L)	SMEWW4500FC	1,5	0,36	0,48
Manganês(mg Mn/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,1	<0,05	<0,05
Mercurio (mg Hg/L)	SMEWW 3112-B	0,001	<0,0002	<0,0002
Nitrato (mg N/L)	SMEWW 4500NO3-B	10	<0,05	<0,05
Prata (mg Ag/L)	SMEWW 3030,3120-B	0,05	<0,01	<0,01
Selênio (mg Se/L)	SMEWW 3114-B	0,01	<0,01	<0,01
Sódio (mg Na/L)	SMEWW 3030,3120-B	200	0,96	1,1
Sulfato (mg SO ₄ ⁻² /L)	SMEWW 4500SO4-E	250	15,2	16,8
Zinco (mg Zn/L)	SMEWW 3030,3120-B	5	<0,1	<0,1
Orgânicos				
Fenóis Totais (mg C6 H5)	SMEWW 5530-B, C, D	0,01	<0,001	<0,001
Surfactantes (mg MBAS/L)	SMEWW 5540-C	0,5	<0,10	<0,10

Conforme os resultados apresentados no Quadro 4.3, a amostra da escória de ferro silício-mangânês foi classificada como Classe II A (não perigoso – não inerte) por conter um teor de Alumínio solubilizado acima do limite máximo permitido.

Para o ensaio de solubilização realizado, o Alumínio (Al) apresentou um valor acima do limite máximo estabelecido da norma NBR10004 (2004). Considerando que o composto Alumínio é material presente de forma natural em solos e areia e se encontra presente na crosta terrestre de forma geral, acredita-se que não há impedimento do uso da escória no objeto do estudo.

4.2 Caracterização do Ligante- CAP

Nesse estudo, utilizou-se um ligante convencional, classificado por penetração como CAP 30/45, a Tabela 4.2, apresenta os resultados das análises realizadas no laboratório REGAP/OT/QP, relativas às principais características das especificações Superpave do CAP utilizado nesta pesquisa, em conformidade com a ASTM D 6373-99. É possível observar que, o ligante atendeu às especificações brasileiras regulamentadas pelo Departamento Nacional de Combustíveis.

Tabela 4.2 - Resultados das análises relativas às especificações Superpave da amostra de CAP 30/45.

Parâmetros	Método		Especificações	Resultados	Unidade
	ABNT	ASTM			
Penetração	NBR 6576	D5	30/45	32	0,1mm
Ponto de Amolecimento	NBR6560	D36	52 mín	53,4	°C
Viscosidade Brookfield 135°C-SP21 20RPM	NBR15184	D4402	374 mín	440	cP
Viscosidade Brookfield 135°C-SP21 20RPM	NBR15184	D4402	203 mín	217	cP
Viscosidade Brookfield 135°C-SP21 20RPM	NBR15184	D4402	76 a 285	78,0	cP
RTFOT- Penetração Retida	NBR6560	D5	60 mín	75,0	%
RTFOT- Aumento do Ponto de Amolecimento	NBR6560	D36	8 máx	4,1	°C
RTFOT- Ductilidade a 25°C	NBR6293	D113	10 mín	>150	cm
RTFOT- Variação em % massa	NBR15235	D2872	0,5 máx	-0,049	%
Ductilidade a 25°C	NBR6393	D113	60 mín	>150	°C
Solubilidade no Tricloroetileno	NBR15855	D2042	99,5 mín	99,9	N/A
Ponto de Fulgor	NBR11341	D92	235 mín	348	N/A
Índice de Suscetibilidade Térmica	N/A	X018	-1,5 a 0,7	-1,3	N/A
Densidade Relativa a 20/4°C	N/A	D70	N/A	1,005	N/A
Aquecimento a 177°C	N/E	N/E	NESP	NESP	N/A

Para melhor controle do ligante, também foram realizados alguns ensaios de caracterização no laboratório da Usina Tamasa no período em que se coletou a amostra, estas especificações e os valores medidos no CAP, as características julgadas mais importantes encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Especificações e valores medidos para a amostra de CAP 30/45.

Parâmetros	Unidade	Método/Norma	Especificações	Resultados		
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Penetração	0,1mm	NBR 6576	30/45	34	35	34
Viscosidade ssF a 150°	s	NBR 14950	90 mín	110	121	126
Ponto de Fulgor	°C	NBR11341	235 mín	332	325	320
Ponto de Amolecimento	°C	NBR6560	52 mín	53	54	53
Espuma a 175°C	N/A	N/A	NA	NESP	NESP	NESP
Suscetibilidade Térmica	N/A	N/A	-1,5 a 0,7	-1,3	-1,4	-1,4

4.3 Projeto das Misturas Asfálticas

4.3.1 Misturas de Agregados

Nesse estudo, trabalhou-se com três misturas asfálticas do tipo CBUQ, denominadas como Escória 1, Escória 2 e Convencional. As porcentagens de uso dos agregados e das escórias ilustradas a seguir.

- **Mistura Convencional**

O Quadro 4.4, mostra detalhadamente a granulometria da Mistura Convencional e Figura 4.5 mostra a curva granulométrica desse traço.

PENEIRAS		Granulometria dos Agregados				Composição da Mistura				(M.F.)	FAIXA-B- (DNIT)			
MALHA		Brita 1	Brita 0	Pó	Areia	B 1	B O	PÒ	Areia	MISTURA FINAL.	FAIXA - B		FAIXA TRAB.	
POL.	m.m					18,0	30,0	40,0	12,0					
1"	25,40	100,0	100,0	100,0	100,0	18,0	30,0	40,0	12,0	100	95	100	95	100
3/4"	19,10	97,3	100,0	100,0	100,0	17,5	30,0	40,0	12,0	99,5	80	100	89	100
3/8"	12,70	5,1	75,6	100,0	100,0	0,9	22,7	40,0	12,0	75,6	45	80	70	78
4	9,52	0,1	12,9	99,6	98,4	0,0	3,9	39,8	11,8	55,5	28	60	50	58
10	4,76	0,0	2,0	68,1	96,5	0,0	0,6	27,2	11,6	39,4	20	45	35	43
40	2,00	0,0	2,0	35,0	44,0	0,0	0,6	14,0	5,2	19,8	10	32	15	28
80	0,180	0,0	2,0	28,1	8,2	0,0	0,6	11,2	1,0	12,8	8	20	8	15
200	0,075	0,0	0,0	7,4	0,6	0,0	0,0	3,0	0,0	3,0	3	8	3	7

Quadro 4.4 – Composição granulométrica da Mistura Convencional.

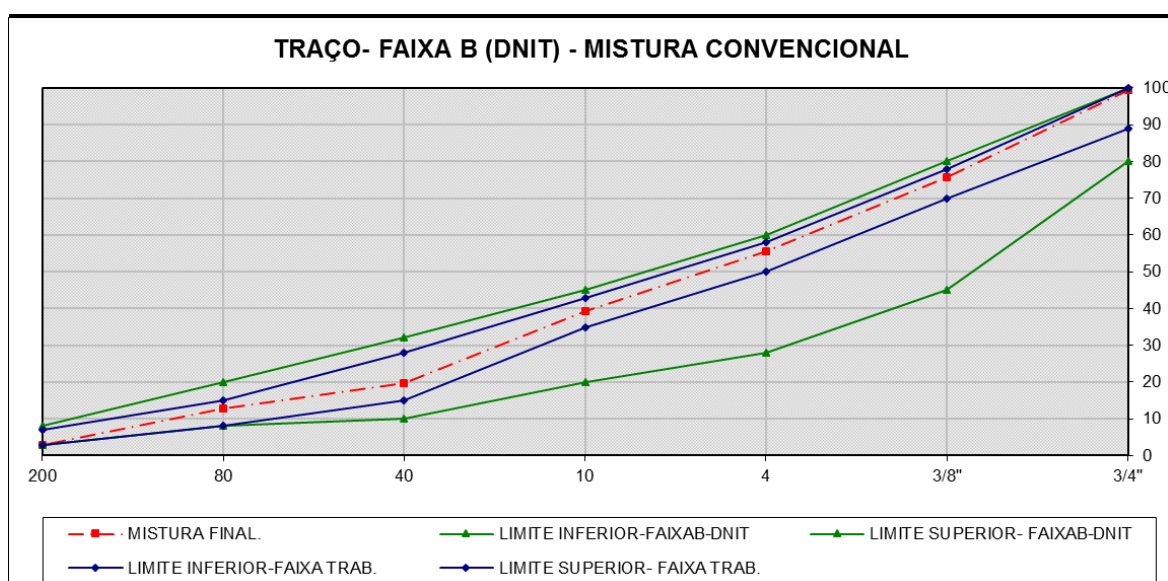


Figura 4.5 - Enquadramento da mistura convencional de agregados na faixa B do DNER.

• Mistura Escória 1

Já no Quadro 4.5 tem-se a granulometria da Mistura Escória 1 e a Figura 4.6 exibe a curva granulométrica desse traço.

PENEIRAS		(%) Passando						(%) Composição da Mistura						(M.F.)	FAIXA-B- (DNIT)			
MALHA		Brita 1	Brita 0	E 1	E 0	Pó	Areia	B 1	B 0	E 1	E 0	Pó	Areia	MISTURA FINAL.	FAIXA - B		FAIXA TRAB	
POL.	m.m							2,0	7,0	30,0	11,0	39,0	11,0					
1"	25,40	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	2,0	7,0	30,0	11,0	39,0	11,0	100	95	100	95	100
3/4"	19,10	97,3	100,0	78,2	100,0	100,0	100,0	1,9	7,0	23,4	11,0	39,0	11,0	93,4	80	100	89	100
3/8"	12,70	5,1	75,6	13,6	71,1	100,0	100,0	0,1	5,3	4,1	7,8	39,0	11,0	67,3	45	80	60	75
4	9,52	0,1	12,9	2,2	43,0	99,6	98,4	0,0	0,9	0,6	4,7	38,8	10,8	55,9	28	60	50	58
10	4,76	0,0	2,0	1,0	5,3	68,1	96,5	0,0	0,1	0,3	0,6	26,5	10,6	38,2	20	45	35	43
40	2,00	0,0	2,0	0,9	1,7	35,0	44,0	0,0	0,1	0,3	0,2	13,7	4,8	19,0	10	32	15	28
80	0,180	0,0	2,0	0,5	0,8	28,1	8,2	0,0	0,1	0,2	0,1	10,9	0,9	12,2	8	20	8	15
200	0,075	0,0	0,0	0,2	0,0	7,4	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	3,0	3	8	3	7

Quadro 4.5- Composição granulométrica da Mistura Escória 1.

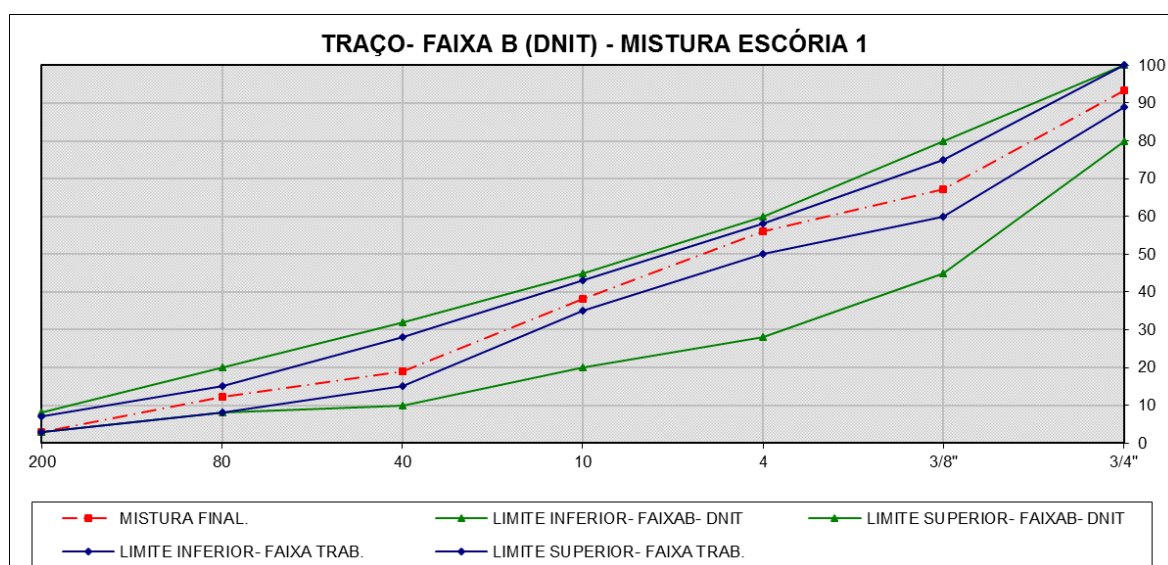


Figura 4.6 - Enquadramento da mistura Escória 1 de agregados na faixa B do DNER.

• Mistura Escória 2

Por último, o Quadro 4.6 mostra a granulometria da Mistura Escória 2 e a Figura 4.7 a curva granulométrica desse traço.

PENEIRAS		(%) Passando						(%) Composição da Mistura						(M.F.)	FAIXA-B- (DNIT)			
MALHA		Brita 1	Brita 0	E 1	E 0	Pó	Areia	B 1	B 0	E 1	E 0	Pó	Areia	MISTURA FINAL.	FAIXA - B		FAIXA TRAB.	
POL.	m.m							6,0	5,0	30,0	7,0	39,0	13,0					
1"	25,40	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	6,0	5,0	30,0	7,0	39,0	13,0	100	95	100	95	100
3/4"	19,10	97,3	100,0	78,2	100,0	100,0	100,0	5,8	5,0	23,4	7,0	39,0	13,0	93,3	80	100	89	100
3/8"	12,70	5,1	75,6	13,6	71,1	100,0	100,0	0,3	3,8	4,1	5,0	39,0	13,0	65,1	45	80	60	75
4	9,52	0,1	12,9	2,2	43,0	99,6	98,4	0,0	0,6	0,6	3,0	38,8	12,8	55,9	28	60	50	59
10	4,76	0,0	2,0	1,0	5,3	68,1	96,5	0,0	0,1	0,3	0,4	26,5	12,5	39,9	20	45	35	43
40	2,00	0,0	2,0	0,9	1,7	35,0	44,0	0,0	0,1	0,3	0,1	13,7	5,6	19,7	10	32	15	28
80	0,180	0,0	2,0	0,5	0,8	28,1	8,2	0,0	0,1	0,2	0,1	10,9	1,0	12,3	8	20	8	15
200	0,075	0,0	0,0	0,2	0,0	7,4	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	3,0	3	8	3	7

Quadro 4.6- Composição granulométrica da Mistura Escória 2.

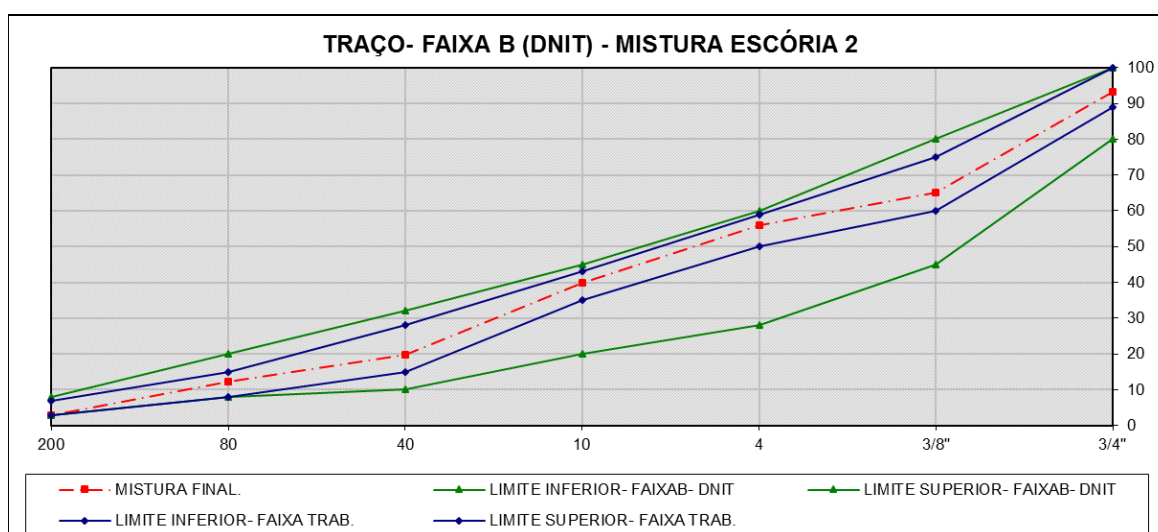


Figura 4.7 - Enquadramento da mistura escória 2 de agregados na faixa B do DNIT.

Percebe-se, pelas Figuras 4.5 a 4.7, que as misturas experimentais, com escória, e a comparativa, com brita de origem granítica, enquadram-se nos limites da faixa B do DNIT para revestimentos do tipo CBUQ, aproximando-se do contorno superior para peneiras com abertura igual ou acima de 10 mm. Buscou-se fazer com que as curvas granulométricas das misturas com escória coincidisse com a curva da mistura de agregado convencional, a semelhança das três curvas é verificada nessas figuras.

Na metodologia Superpave, o tamanho nominal máximo (TNM), é aquele correspondente à abertura de peneira de tamanho superior à que apresentar mais de 10% em peso retido. A granulometria das três misturas em análise, ficaram enquadradas na especificação para o tamanho nominal máximo (TNM) de 19mm.

4.3.2 Requisitos volumétricos de mistura utilizando os parâmetros Superpave

Posteriormente a seleção dos materiais, ligante asfáltico e agregados minerais, e da escolha granulométrica adotada, tem-se como etapa subsequente, a compactação de corpos de prova com um teor experimental para cada mistura, que é alcançado por meio de estimativas usando-se a densidade efetiva da mistura.

De posse desses resultados, definiu-se as propriedades volumétricas das misturas e o teor de pó após a compactação dos corpos-de-prova no compactador giratório com o número de 100 giros de projeto, determinado em função do tráfego. Nas Tabelas 4.4 a 4.6, são apresentadas as características volumétricas e de densidade das misturas ensaiadas, a partir de uma média de dois corpos de prova por teor analisado, calculados através da metodologia adotada pela ASTM.

Tabela 4.4 - Parâmetros Volumétricos Médios, calculados segundo a metodologia da ASTM para a mistura Convencional.

Teor de ligante	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	Unidade
Densidade Máxima Medida da Mistura (Gmm)	2,547	2,527	2,507	2,486	2,466	g/cm³
Densidade Aparente da Mistura (Gmb)	2,383	2,449	2,467	2,462	2,455	g/cm³
Densidade Máxima Teórica (DMT)	2,449	2,431	2,413	2,395	2,378	g/cm³
Teor de Vazios (Va)	6,447	3,077	1,598	0,983	0,434	%
Teor de Agregados (Ps)	0,960	0,955	0,950	0,945	0,940	%
Densidade Aparente dos Agregados (Gsb)	2,579	2,579	2,579	2,579	2,579	g/cm³
Vazios do agregado mineral (VMA)	11,3	9,31	9,13	9,8	10,51	%
Vazios Preenchidos por Asfalto (VFA)	42,97	67,06	82,49	90,06	95,87	%
Teor de Asfalto Efetivo (Pbe)	3,70	4,20	4,70	5,21	5,71	%
% passante na #0,075 mm (P _{0,075})	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	%
Teor de Filer (Tf)	1,05	0,93	0,83	0,75	0,68	%

Tabela 4.5 - Parâmetros Volumétricos Médios, calculados segundo a metodologia da ASTM para a mistura Escória 1.

Teor de ligante	4,5	5,0	5,5	6,0	Unidade
Densidade Máxima Medida da Mistura (Gmm)	2,650	2,629	2,607	2,586	g/cm³
Densidade Aparente da Mistura (Gmb)	2,518	2,530	2,548	2,546	g/cm³
Densidade Máxima Teórica (DMT)	2,609	2,587	2,566	2,545	g/cm³
Teor de Vazios (Va)	4,981	3,768	2,270	1,561	%
Teor de Agregados (Ps)	0,955	0,950	0,945	0,940	%
Densidade Aparente dos Agregados (Gsb)	2,789	2,789	2,789	2,789	g/cm³
Vazios do agregado mineral (VMA)	13,78	13,82	13,67	14,20	%
Vazios Preenchidos por Asfalto (VFA)	63,85	72,75	83,43	89,02	%
Teor de Asfalto Efetivo (Pbe)	4,19	4,69	5,20	5,70	%
% passante na #0,075 mm (P _{0,075})	3,90	3,90	3,90	3,90	%
Teor de Filer (Tf)	0,93	0,83	0,75	0,68	%

Tabela 4.6 - Parâmetros Volumétricos Médios, calculados segundo a metodologia da ASTM para a mistura Escória 2.

Teor de ligante	4,5	5,0	5,5	6,0	Unidade
Densidade Máxima Medida da Mistura (Gmm)	2,62	2,60	2,58	2,56	g/cm ³
Densidade Aparente da Mistura (Gmb)	2,51	2,55	2,54	2,54	g/cm ³
Densidade Máxima Teórica (DMT)	2,592	2,571	2,550	2,529	g/cm ³
Teor de Vazios (Va)	3,95	1,99	1,45	0,90	%
Teor de Agregados (Ps)	0,96	0,95	0,95	0,94	%
Densidade Aparente dos Agregados (Gsb)	2,77	2,77	2,77	2,77	g/cm ³
Vazios do agregado mineral (VMA)	13,34	12,70	13,35	14,00	%
Vazios Preenchidos por Asfalto (VFA)	70,44	84,36	89,17	93,65	%
Teor de Asfalto Efetivo (Pbe)	4,21	4,71	5,21	5,71	%
% passante na #0,075 mm (P _{0,075})	3,90	3,90	3,90	3,90	%
Teor de Filer (Tf)	0,93	0,83	0,75	0,68	%

Dessas determinações, observou-se que com relação aos parâmetros apresentados, as misturas de escórias exibem semelhanças, o que já era esperado, visto que, as variações em seus traços foram pequenas.

Com relação ao teor de filer, que expressa a relação entre o ligante total menos o absorvido, foi apresentado valores aceitáveis para esse requisito, uma vez que esses podem variar de 0,6 a 1,2.

Como a obtenção dos teores de projeto é dependente das características volumétricas das misturas. Enfatizou-se, entre os requisitos volumétricos pela metodologia Superpave, a % de volume de vazios na mistura (Vv), a % de vazios no agregado mineral (VAM) e a % de vazios preenchidos com asfalto (RBV), denominado também como VMA.

Assim, com os valores de Va, VAM e RBV encontrados para estas amostras foi obtido os gráficos Va, VAM e RBV *versus* teor de CAP (%), visando atender aos seguintes requisitos:

- Volume de vazios na mistura (Va): igual a 4%;

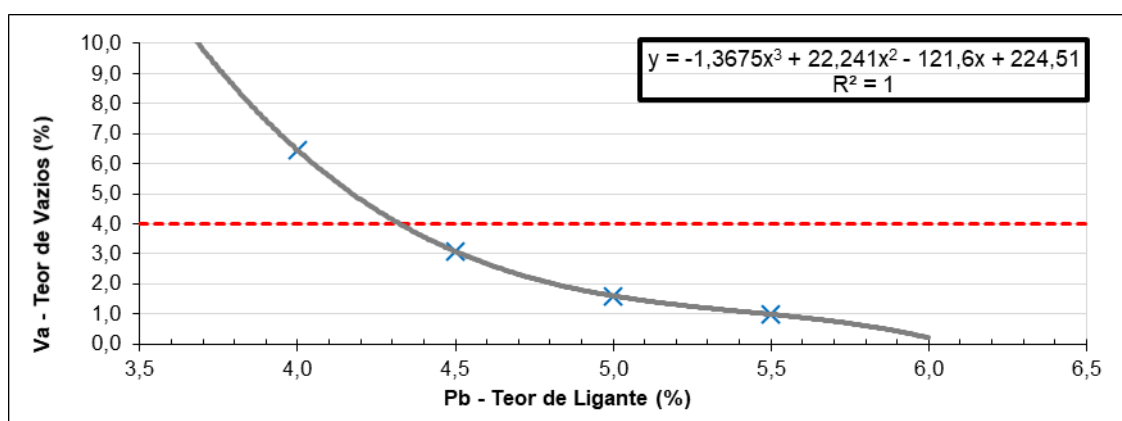


Figura 4.8- Gráfico Teor de Vazios *versus* Teor de Ligante, da mistura convencional.

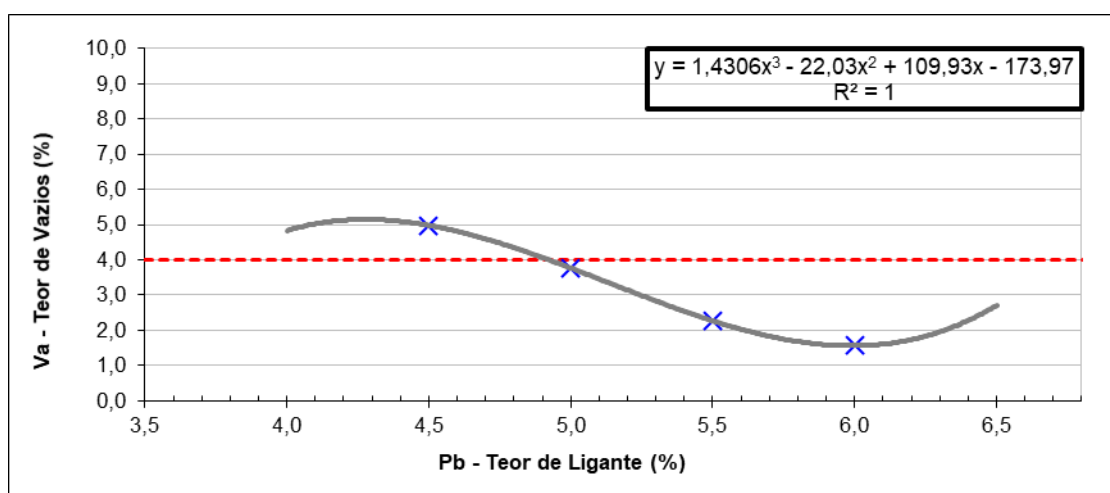


Figura 4.9- Gráfico Teor de Vazios *versus* Teor de Ligante, da mistura escória 1.

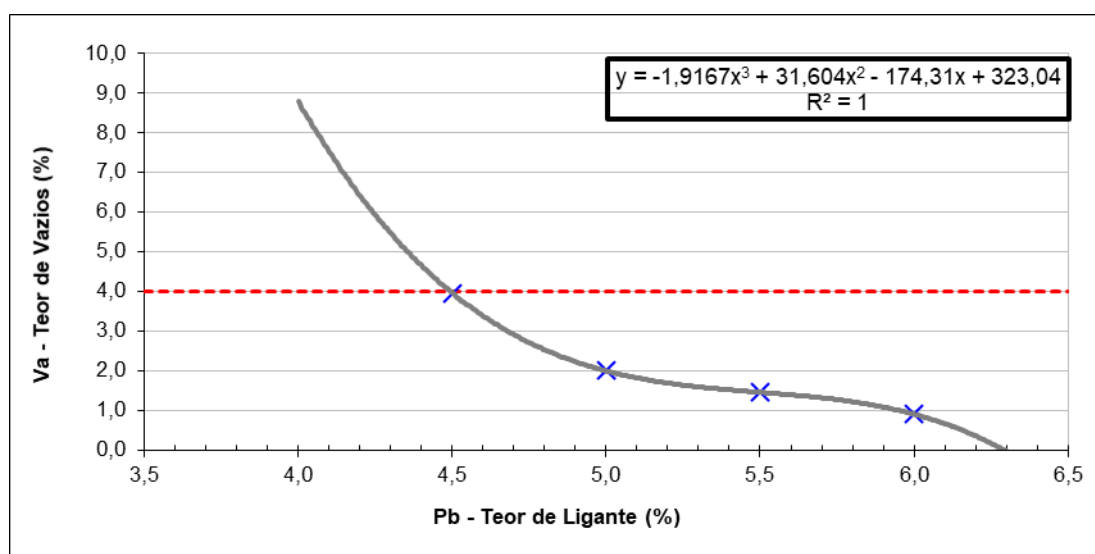


Figura 4.10- Gráfico Teor de Vazios *versus* Teor de Ligante, da mistura escória 2.

A partir dos gráficos das Figuras, 4.8 a 4.10, adotou-se como teor ótimo do ligante para a mistura convencional, 4,3%, para a escória 1, 4,8% e para a escória 2, 4,5%, onde ambos atingem os 4% de vazios adotados na metodologia Superpave.

- Vazios no agregado mineral (VAM): para um projeto com 4% de Va, o VAM é especificado em função do tamanho nominal máximo do agregado, conforme Quadro 4.7;

Quadro 4.7 - Recomendações Superpave para VAM (AASHTO MP2, 2001).

Tamanho Nominal Máximo do Agregado	VAM mínimo (%)
9,5mm	15,0
12,5mm	14,0
19mm	13,0
25mm	12,0
37,5mm	11,0

Fonte: Motta *et. al.* (1996).

Nos gráficos abaixo, Figuras 4.11 a 4.13, observa-se que para os teores ótimos de ligante considerados, o VAM mínimo, 13%, não se enquadra para a mistura convencional. Já para as misturas de escórias esse parâmetro é atendido.

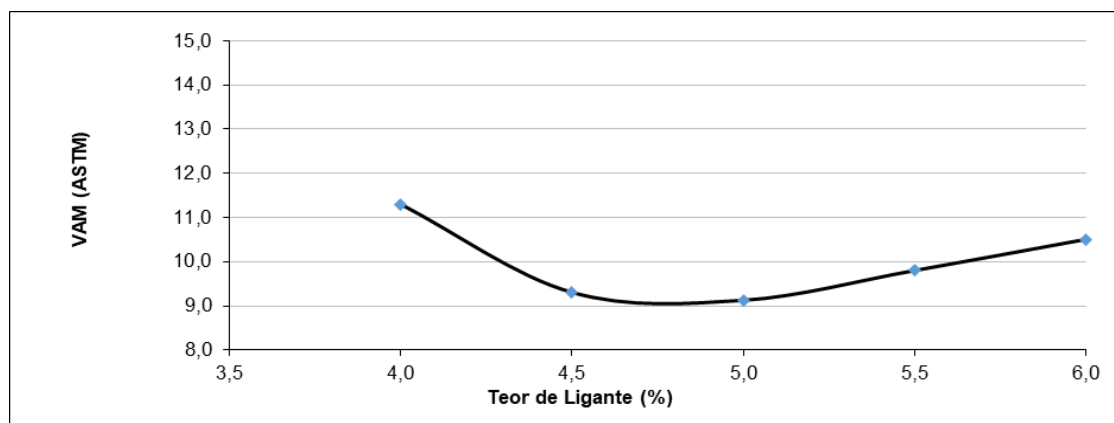


Figura 4.11- Gráfico VAM versus Teor de Ligante, da mistura convencional.

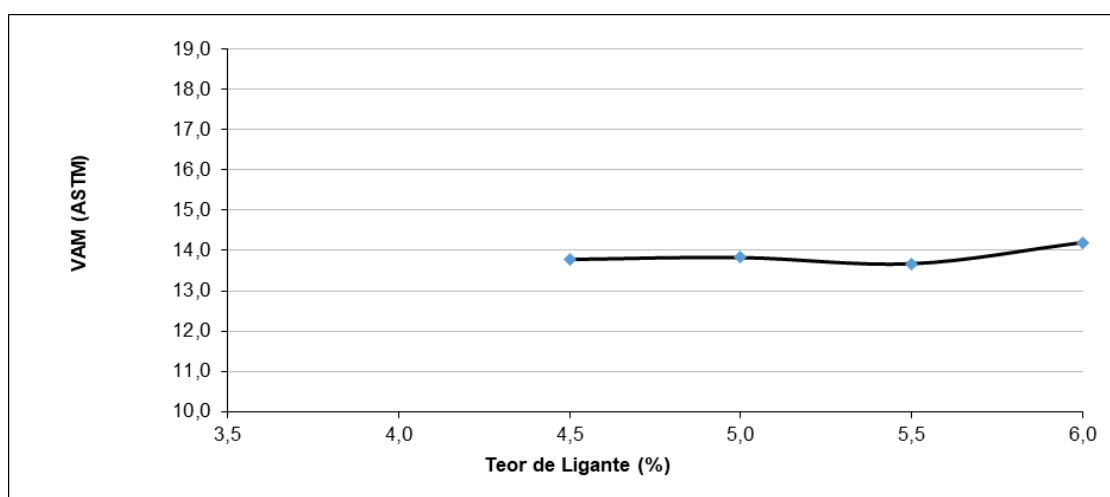


Figura 4.12 - Gráfico VAM versus Teor de Ligante, da mistura escória 1.

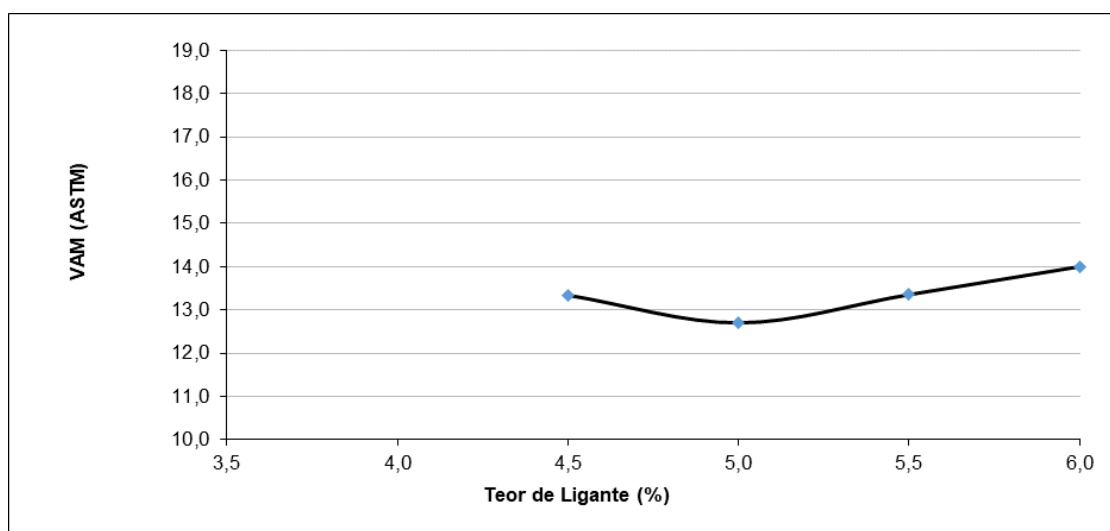


Figura 4.13 - Gráfico VAM versus Teor de Ligante, da mistura escória 2.

- Vazios preenchidos com asfalto (RBV): para um projeto com 4% de V_v , o RBV é especificado em função do volume de tráfego (ESAL) conforme Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Recomendações Superpave para RBV (AASHTO MP2, 2001).

Tráfego, ESALs	RBV de Projeto (%)
$< 3 \times 10^5$	70 – 80
$3 \times 10^5 < \text{ESAL} < 3 \times 10^6$	65 – 78
$> 3 \times 10^6$	65 – 75

Fonte: MOTTA *et. al.* (1996).

Observando esse quadro, tem-se valores limites da especificação de 65-75% para o RBV de projeto, uma vez que, foi considerado para esse estudo o tráfego ESAL 3×10^6 a 3×10^7 .

Nessa análise, a partir das Figuras 4.14 a 4.16, é evidenciado que somente a mistura convencional não se enquadra nesse critério, possuindo uma relação de vazios preenchidos com asfalto menor que a recomendação Superpave.

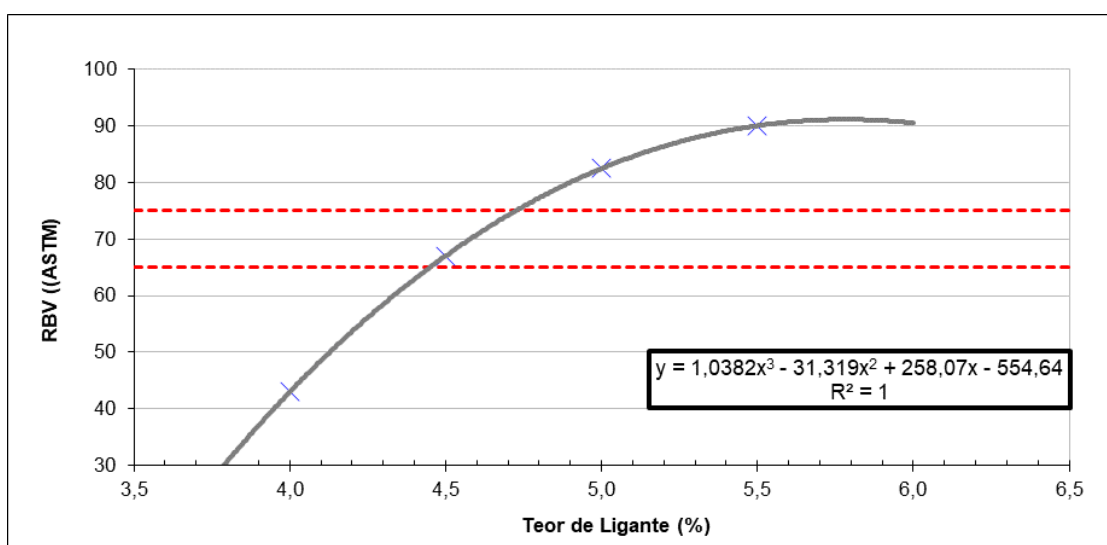


Figura 4.14 - Gráfico RBV versus Teor de Ligante, da mistura convencional.

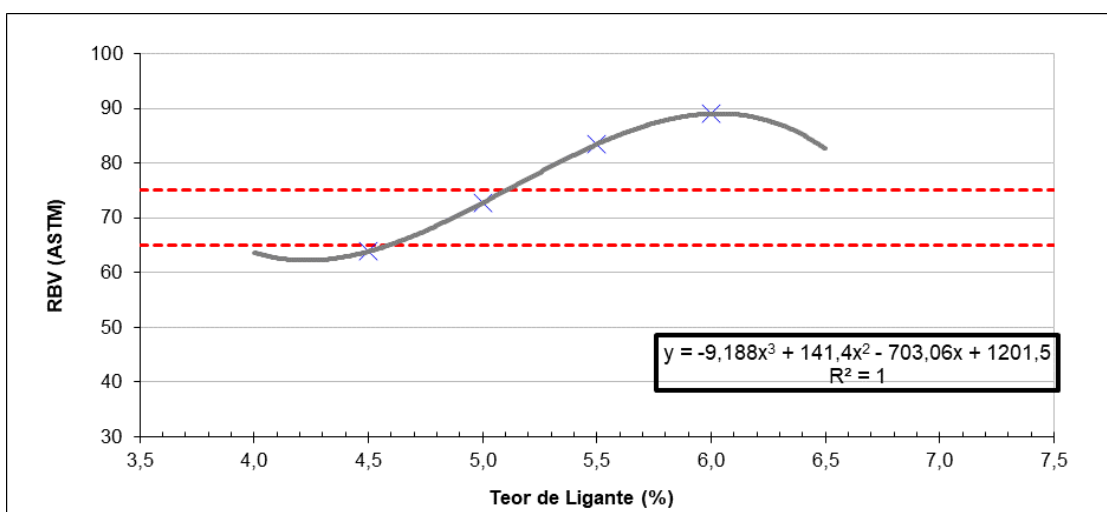


Figura 4.15 - Gráfico RBV versus Teor de Ligante, da mistura escória 1.

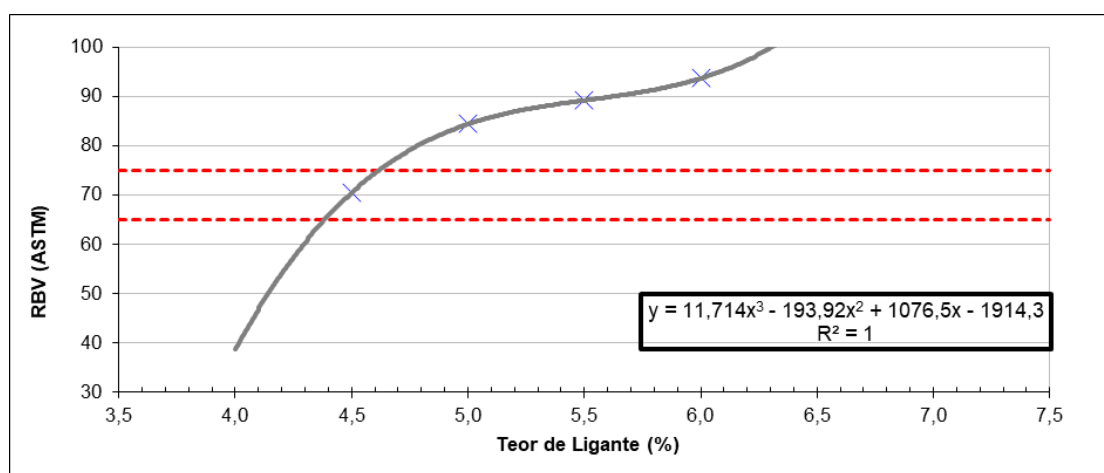
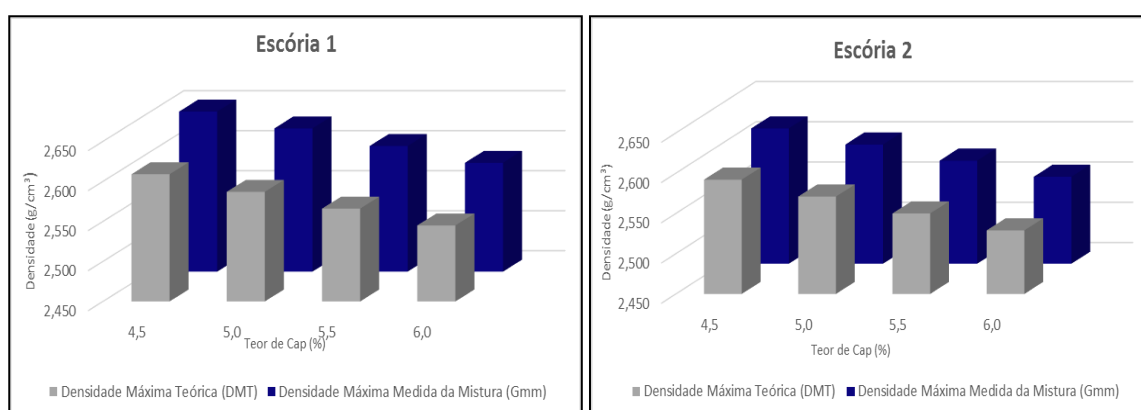


Figura 4.16 - Gráfico RBV *versus* Teor de Ligante, da mistura escória 2.

Os resultados das misturas apresentam coerência com o valor de V_a diminuindo e o valor de RBV aumentando, quanto maior o teor de ligante utilizado na mistura.

Visto o não enquadramento de dois parâmetros para o teor de ligante da mistura convencional, é recomendado, para trabalhos futuros, que seja revisto o projeto de misturas dos agregados convencionais.

Ainda, como é possível verificar na Figura 4.17, para as três misturas e em todos os teores de CAP, os valores calculados para a densidade máxima teórica, DMT, são inferiores à densidade máxima medida, GMM. No entanto, era esperado que se obtivesse um menor valor de GMM, considerando que o DMT, adquirido com a utilização de fórmula, considera um menor volume, mas, para essa análise isto não foi constatado.



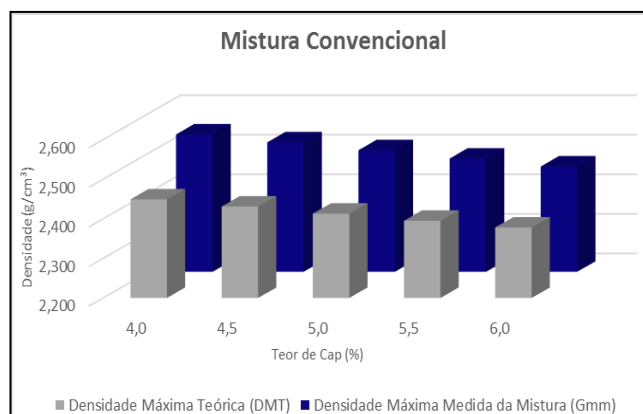


Figura 4.17 - Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT) e Densidade Máxima Medida (GMM) das misturas *versus* teor de CAP.

Como era previsto, observa-se que os DMTs e GMMs das misturas que contém escória apresentaram maiores valores em relação a mistura convencional, visto que a densidade da escória de FeSiMn é mais elevada que a dos agregados convencionais adotados.

4.4 Análises Mecânicas

Para caracterização mecânica, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de módulo de resiliência (MR), resistência a tração por compressão diametral (RT), fadiga por compressão diametral a tensão controlada das misturas estudadas.

4.4.1 Módulo de Resiliência

Inicialmente, são apresentados os módulos de resiliência obtidos, sendo que os relatórios completos de todos os ensaios realizados constam no Anexo II. Para cada mistura, são mostrados três ensaios de módulo de resiliência. E a cada ensaio, têm-se três

valores determinados para cada um dos três ciclos de carregamento, conforme observado nos relatórios em anexo.

Na Tabela 4.7, são exibidos os resultados médios dos módulos de resiliência (MR), bem como o desvio padrão (DP) para cada mistura adotada.

Tabela 4.7 - Valores obtidos de Módulo de Resiliência para as misturas à 25°C.

Mistura/ Teor de Ligante (%)	CP	Módulo de Resiliência (Mpa)	Módulo de Resiliência Médio (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)	Número de Amostras (n)
4,3 % - C	1	10266	10312	298	3
	2	10040			
	3	10631			
4,5% - E2	1	9185	9885	876	3
	2	9603			
	3	10867			
4,8% - E 1	1	10001	10027	62	3
	2	10098			
	3	9982			

E na Figura 4.18, visualiza-se graficamente, os módulos determinados.

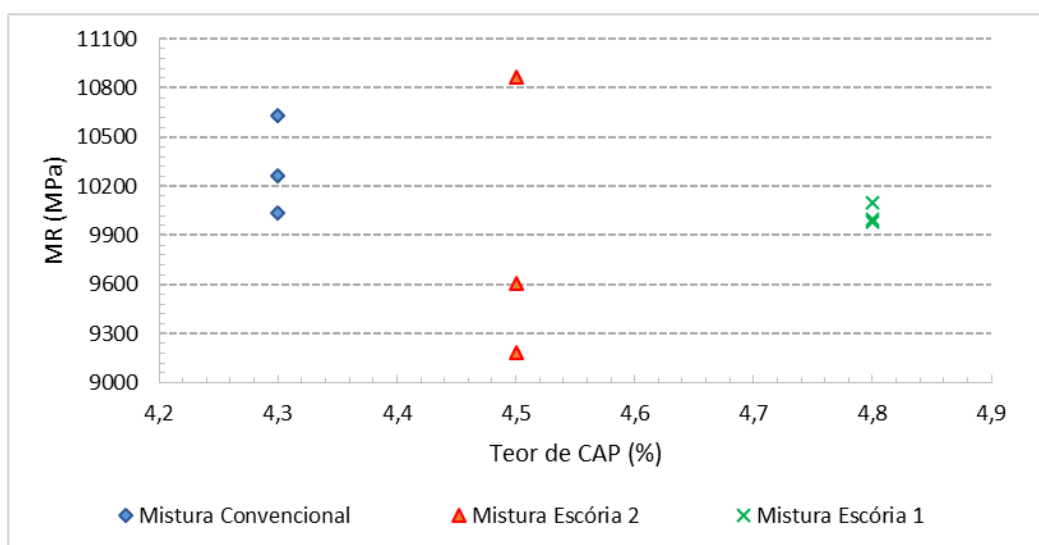


Figura 4.18 - Resultados dos módulos de resiliência de todas as misturas, à 25°C.

O maior valor médio de MR encontrado foi para a mistura denominada convencional, com teor de CAP de 4,5%. Observa-se que para as misturas de escória, a escória 1, que possui um maior teor de CAP, 4,8%, apresentou um maior valor de MR, em relação a mistura escória 2, com teor de CAP de 4,3%.

A mistura com 4,3% de ligante, mistura escória 2, apresentou as maiores variações dos valores de MR em relação à média dos valores, seguida da mistura convencional e por último a mistura que apresentou menos dispersão foi a escória 1. Essas dispersões são melhor visualizadas na Figura 4.18.

Percebe-se pelos resultados da Tabela 4.7, que foram encontrados altos valores de módulos, indicando que as misturas em análise possuem uma alta rigidez. Estes altos valores podem ser justificados devido ao baixo teor de projeto encontrado para todas as misturas, uma vez que, há a tendência de que a mistura tenha a sua rigidez diminuída com o aumento de teor de ligante na mesma.

É relevante ressaltar que, afirmar que quanto maior o valor do módulo de resiliência melhor o desempenho da mistura asfáltica pode não ser verdadeiro. As misturas asfálticas devem possuir flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego e boa resistência a tração para evitar rupturas precoces (REIS, 2002).

Em estudos referenciados sobre a análise mecânica das misturas asfálticas com o emprego de outros tipos de escória, os MRs encontrados, quando comparados com as misturas desse trabalho, destoaram muito e se apresentaram bem inferiores. Assim sendo, acredita-se que a heterogeneidade dos agregados da escória possui bastante relevância e influência direta nos resultados de MR, uma vez que cada tipo de escória apresenta propriedades e características peculiares.

Diferente do que era esperado, não se pode dizer que a substituição do agregado convencional pela escoria de FeSiMn torna a mistura mais rígida e conseqüentemente leva a maiores valores de módulo de resiliência.

4.4.2 Resistência a Tração por Compressão Diametral

Foram realizados três ensaios para cada misturas, sendo o resultado médio de RT uma média aritmética. Na Tabela 4.8, estão dispostos esses resultados médios de resistência a tração indireta por compressão diametral (RT) e também a relação MR/RT obtida para todas as misturas analisadas.

Tabela 4.8 - Resultados obtidos de Resistência a tração para todas as misturas à 25 °C.

Mistura/ Teor de Ligante (%)	CP	RT (MPa)	RT Médio (MPa)	Desvio Padrão (Mpa)	Módulo de Resiliência (Mpa)	MR/RT	Número de Amostras (n)
4,3 % - C	1	2,3	2,31	0,07	10312	4464	3
	2	2,38					
	3	2,25					
4,5% - E2	1	2,4	3,23	0,72	9885	3060	3
	2	3,65					
	3	3,64					
4,8% - E1	1	2,39	2,31	0,07	10027	4341	3
	2	2,29					
	3	2,25					

Dentre as misturas, não foram apresentadas grandes dispersões de valores de RT, a maior variação encontrada foi para a mistura denominada escória 2. E o maior valor médio de RT encontrado, 3,23 Mpa, foi para a mistura E2, com teor de 4,5% de ligante. As misturas escória 1 e convencional apresentaram os mesmos valores de RT.

A Figura 4.19, ilustra as RTs encontradas.

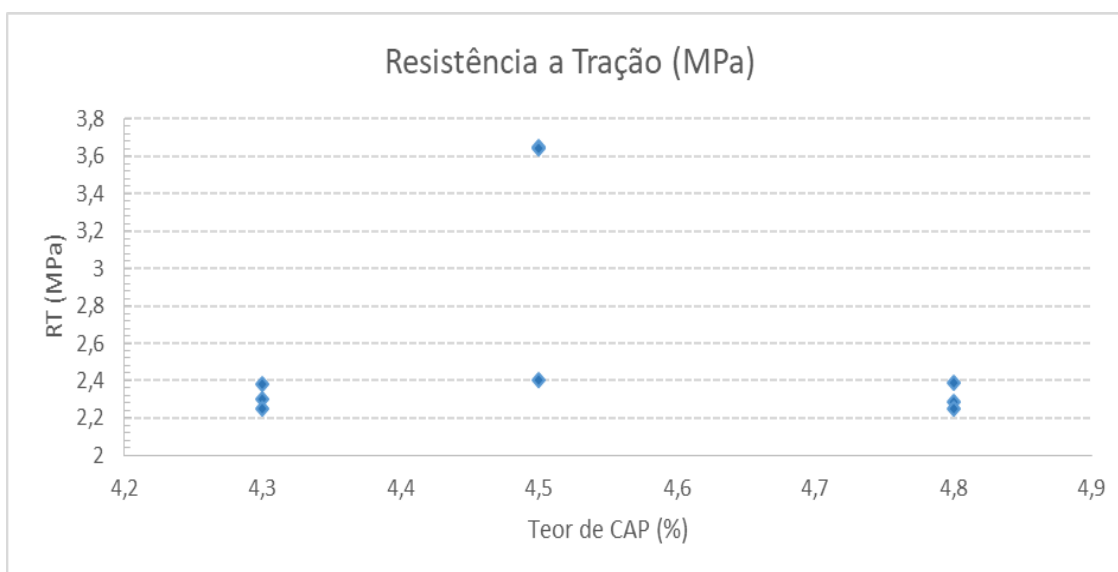


Figura 4.19 - Resultados das RTs de todas as misturas, à 25°C.

Comparando as misturas de escória, conforme esperado, o maior valor de RT foi encontrado para a mistura escória 2, que possui o menor teor de ligante. Isso deve-se ao fato de que, uma maior concentração de ligante na mistura asfáltica tende a torná-la mais flexível, enfraquecendo o intertravamento entre as partículas de agregados pelo aumentando do afastamento dos grãos, e dessa forma, diminuindo a resistência a tração estática da mistura.

A relação MR/RT foi de 4464 para a mistura convencional, para a mistura escória 1 foi de 4341 e para a escória 2 de 3060. Quanto menor essa relação, melhor o comportamento mecânico garantindo uma combinação de boa flexibilidade para uma certa resistência à tração. Portanto, apresentou-se um melhor comportamento a escória 2, seguida da escória 1, resultando que, para a relação desses ensaios, houve um melhor desempenho das misturas compostas pelo agregado siderúrgico em relação à composta pelo agregado convencional.

4.4.3 Fadiga

Para determinação da vida de fadiga das misturas, as amostras foram submetidas a um nível de tensão que variou de 40 a 15% do valor da RT, para as misturas escória 1 e convencional, e de 35% a 10% para a mistura escória 2. Esses resultados encontram-se de forma detalhada no Anexo III.

Tabela 4.9 - Número de aplicações e tensões obtidos nos ensaios de Vida de Fadiga.

Escória 2			Escória 1			Convencional		
Número De Aplicações (N)	Diferença de Tensões (Mpa)	Deformação Específica Resiliente (‰)	Número De Aplicações (N)	Diferença de Tensões (Mpa)	Deformação Específica Resiliente (‰)	Número De Aplicações (N)	Diferença de Tensões (Mpa)	Deformação Específica Resiliente (‰)
232	4,52	1,14E-04	552	3,7	9,22E-05	1205	3,7	8,96E-05
545	3,88	9,80E-05	1596	3,23	8,06E-05	2027	3,23	7,84E-05
880	3,23	8,17E-05	2093	2,77	6,91E-05	9932	2,77	6,72E-05
3170	2,58	6,54E-05	13734	2,31	5,76E-05	8752	2,31	5,60E-05
17180	1,94	4,90E-05	14908	1,85	4,61E-05	31076	1,85	4,48E-05
149217	1,29	3,27E-05	75204	1,39	3,46E-05	68188	1,39	3,36E-05

Quanto a vida de fadiga, a partir da Tabela 4.9, observou-se que para as tensões baixas a Mistura 2 tem uma tendência maior a Vida de Fadiga do que as misturas escória 1 e convencional. A boa relação apresentada pela mistura escória 2, com relação ao módulo de resiliência e a resistência à tração (MR/RT), foi comprovado no resultado do ensaio de vida de fadiga.

Para as altas tensões, a mistura convencional passa a ter uma tendência a uma Vida de Fadiga maior em relação as demais. Ressaltando que as considerações sobre a Vida de fadiga valem considerando a mesma estrutura das camadas, sendo a única camada variável a do revestimento asfáltico

Na Tabela 4.10, estão expressas as constantes (K e n), o coeficiente de regressão linear (R^2), bem como os modelos de fadiga obtidos para as curvas de fadiga, das misturas analisadas, destacando-se a relação entre a diferença de tensões aplicadas com a vida de fadiga.

Tabela 4.10 - Parâmetros das Curvas de Fadiga das misturas, analisado por Diferença de Tensões.

Mistura	Parâmetros			Modelo de Fadiga
	K	n	R ²	
E1	3,98E+05	4,859	0,9541	$N=3,98E+05(1/\Delta\sigma)^{4,86}$
E2	5,07E+05	5,178	0,9942	$N=5,07E+05(1/\Delta\sigma)^{5,18}$
C	3,26E+05	4,108	0,9403	$N=3,26E+05(1/\Delta\sigma)^{4,11}$

A constante n, que indica a inclinação da curva, das misturas contendo escória de FeSiMn e da convencional, exibiram valores próximos, demonstrando que as curvas de fadiga das mesmas, apresentam uma correspondência das declividades. Na literatura, autores apontam valores deste coeficiente entre 1,58 até 7,1, conforme Monismith *et al* (1990).

O valor de K da mistura escória 2 apresentou o maior valor. E para as composições escória 1 e convencional, que foram submetidas a mesmas proporções de níveis de tensões, foram apresentados valores de K bem próximos, o que indica que as vidas de fadiga dessas misturas são semelhantes.

Esperava-se que a vida de fadiga da mistura convencional fosse mais elevada que as misturas contendo escória, pelo fato dessa ter apresentado um maior valor de MR que as outras misturas, não sendo comprovado essa característica nesses ensaios de fadiga.

Na Tabela 4.11, também são expressas as mesmas constantes da análise anterior, para estas curvas de fadiga, no entanto, considera-se aqui essa relação entre as deformações específicas resilientes. Nessa consideração, tem-se que a constante n e K apresentou o mesmo comportamento da análise feita por diferença de tensões.

Tabela 4.11- Parâmetros das Curvas de Fadiga das misturas, analisado por Deformação Específica Resiliente.

Mistura	Parâmetros			Modelo de Fadiga
	K	n	R ²	
E1	2,00E-17	4,845	0,9536	$N=2,00E-17(1/\Delta\varepsilon)^{4,85}$
E2	7,60E-19	5,183	0,9943	$N=7,60E-19(1/\Delta\varepsilon)^{5,18}$
C	4,00E-14	4,095	0,9398	$N=4,00E-14(1/\Delta\varepsilon)^{4,10}$

Estatisticamente, vale ressaltar que a qualidade do “ajuste” dos modelos de regressão linear empregados se mostraram apropriados, em todos os casos, já que apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2) superiores a 0,93%, sendo que quanto mais próximos a 1, menor é a dispersão dos pontos ensaiados em relação ao modelo, portanto, neste estudo, pelo menos 93% das variáveis dependentes são explicadas pelos regressores presentes nos modelos.

É de suma importância, enfatizar que as diferenças de tensões que ocorrem no pavimento dependem de sua estrutura como um todo e do valor de rigidez de cada camada, dessa forma, ao avaliar o desempenho à fadiga de misturas asfálticas, deve ser considerada para análise todo o sistema de camadas constituintes do pavimento, e não apenas pela curva de fadiga gerada para a mistura asfáltica, como ressalta Medina e Motta (2005).

CAPÍTULO 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reutilização das escórias é, atualmente, um aspecto de extrema relevância no processo de sustentabilidade, já que seu emprego diminui a extração e o uso de recursos naturais e, muitas vezes, reduz custos para os consumidores. Contudo, embora apresentem grande potencial de aplicação na construção civil, e em especial nas obras rodoviárias do país, é necessário conhecer e analisar se seus parâmetros atendem as determinações de cada projeto e/ou aplicação, de maneira segura.

Para o emprego na pavimentação, conforme referenciado bibliograficamente, a caracterização dos agregados comprovou que o agregado siderúrgico apresenta algumas características físicas superiores ao agregado convencional, e ambas se enquadraram dentro dos limites admitidos pelas normas para utilização em concreto asfáltico.

Considerando as normas ABNT NBR10004/ 2004, 10005/2004 e 10006/2004, é possível atestar que a escória de Ferro Silício-Manganês, objeto dessa pesquisa, é classificada como Classe II A (Não Perigoso – Não Inerte), não apresentando características corrosivas e características reativas. E com relação aos ensaios de caracterização química, principalmente o teor de cal livre, que poderia proporcionar expansão o que tornaria inviável a sua aplicação, os resultados apresentaram um valor desprezível, o que a credencia para o uso no revestimento asfáltico. Assim, avaliando os aspectos químicos e ambientais desse material, tem-se que há o potencial de sua aplicação e recomenda-se a viabilidade de sua aplicação.

Nas misturas contendo o agregado siderúrgico, houve uma redução de cerca de 40% no uso de agregados convencionais. Em se tratando de consumo de CAP, a escória, contribui para um ligeiro aumento desse consumo nas massas asfálticas, mesmo assim, o rejeito não deixa de significar uma alternativa atrativa devido a sua disponibilidade próxima a rodovias e aos ganhos de ordem ambiental, pela minimização do volume de rejeitos depositados em pilhas e redução do passivo ambiental.

A mistura escória 2 apresentou uma melhor relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração por compressão diametral (MR/RT) comparado as demais misturas. Com relação a Vida de fadiga, constatou-se que para as tensões baixas, a mistura escória 2 apresenta uma tendência maior a Vida de Fadiga. Já para as altas tensões, a mistura convencional predispõe a ter uma maior Vida de Fadiga do que as outras misturas. Ressalta-se que as considerações acerca da Vida de fadiga presumem a mesma estrutura das camadas, variando apenas o revestimento asfáltico.

Portanto, o emprego da escória de FeSiMn como agregado em misturas betuminosas do tipo CBUQ apresenta grande potencial de uso em substituição ao agregado convencional, do ponto de vista técnico. Com relação a ganhos de ordem econômica, faz-se necessários estudos posteriores, em que devem ser considerados os valores do CAP, a logística e o baixo valor do agregado siderúrgico em relação ao convencional.

Por intermédio dessas análises, têm-se que as conclusões alcançadas são referentes a ensaios amostrais, para se garantir as características obtidas nos ensaios é necessário a manutenção dos processos de beneficiamento e a não mistura com materiais de outras origens. Outro ponto fundamental é que as escórias carecem de um acompanhamento e controle, a serem implementados nas usinas de geração desse subproduto, com data de geração e com monitoramento a partir de campanhas de ensaios que atestem os valores encontrados nesse estudo inicial, com a intenção de confirmar os valores e, então, utilizar o material.

Através dos investimentos do RDT, a Concessionária Via040 conseguiu realizar esse estudo, contribuindo para o setor de pesquisa e engenharia do Brasil. Os objetivos do projeto foram atingidos, destacando-se os ganhos acadêmicos, uma vez que essa pesquisa será tema de dissertação do mestrado da pesquisadora envolvida.

Por fim, são propostas como sugestões para futuras pesquisas e para a continuidade do trabalho desenvolvido neste projeto de RDT, a construção de trechos rodoviários experimentais com instrumentação para averiguação das características funcionais e estruturais, bem como o desempenho mecânico das escórias de FeSiMn. Além de, um estudo econômico do uso de materiais alternativos em trechos de

pavimentação rodoviária na BR040, com valores reais do processo de construção e se possível manutenção dos trechos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). **NBR 53**. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). **NBR 10004**. Resíduos Sólidos - Classificação.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). **NBR 10005**. Lixiviação de Resíduos - Procedimento.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). **NBR 10006**. Solubilização de Resíduos - Procedimento.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). **NBR 10007**. Amostragem de resíduos sólidos.

Alexandre, J.; Raguin, J. **Beneficiation of blast furnace slag and converter slag in the french iron and steel industry**. In: Committee on environmental affair. Utilisation of blast furnace and BOF slag. Brussels, Belgium: International Iron and Steel Institute, section A2, 1984.

Alvarenga, J. C. A. **Um estudo de avaliação estrutural e econômica de pavimentos flexíveis de escória de aciaria**. Anais do XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Campinas, 2001. v. 1.

Andrade, M. L. A.; Cunha, L. M. S. O setor siderúrgico. In: BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES. **BNDES 50 Anos: histórias setoriais**. Rio de Janeiro, 2002.

Andrade, M. L. A.; Cunha, L. M. S.; Gandra, G. T. **Panorama da indústria mundial de ferroligas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, 1999. n. 10.

Ângulo, S. C.; Zordan, S. E.; Jonh, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. In: IV Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. CT206 – IBRACON, São Paulo, 2001.

AREMA. **Manual for Railway Engineering**. Lanham: American Railway engineering and aintenance Association- AREMA, 2001. v. I - IV.

Asphalt Institute. **Superpave mix design: Superpave series SP-2. 3**. Ed. 2001.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **C127** “Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate”, 1988.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **C128**, Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, 1997.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D2493**. Standard Viscosity-Temperature Chart of Asphalts. American Society for Testing and Materials, 2001.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D2872**. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials, 2004.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D4402**. Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using Brookfield Thermosel Apparatus. American Society for Testing and Materials, 2002.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D4867**. Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures, American Society for Testing and Materials, 1996.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D6373** “Standard pacification for Performance Graded Asphalt Binder”, 1999.

Bagampadde U., et al.. Optimization of Steel Slag Aggregates for Bituminous Mixes in Saudi Arabia. **Journal of Materials in Civil Engineering**., vol 11., 1999.

Bernucci, L. *et al.* **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio

de Janeiro: Petrobras e Abeda, 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário estatístico do setor metalúrgico**. Brasília, 2012. 117p.

Buncher, M.; Duval, J. P.E.. **Superpave for Airports**, Instituto de Asfalto, 2003.

Castelo Branco, V. T. F.. **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado**, 2004 Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

Cominsky, R.; Leahy, R.B.; Harrigan, T.. **Level One Mix Design**: materials selection, compaction and conditioning. Strategic Highway Research Program – SHRP. Washington, 1994.

Coomarasamy, A; Walzak T. L.. Effects of moisture on surface chemistry of steel slag and steel slag-asphalt paving mixes. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1492, 1995.

Cunha, M.B.. **Avaliação do método bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Della, V. P.; *et al.*. **By-product Utilization of metallic recovering of stainless steel slags in the ceramic pigments synthesis: Raw material characterization**. Cerâmica, 2005. vol. 51.

DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS. United Kingdom, 2000. **Mineral planning guidance note 11 – Controlling e mitigating the environmental effects of mineral extration in England** – Consultation paper.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 133/94**, Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 138/94**, Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 078**, Agregado Graúdo – Adesividade a Ligante Betuminoso.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 081**, Agregado – Determinação de densidade relativa.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 089**, Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 093**, Solos – Determinação da densidade real.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 117**, Mistura Betuminosa – Determinação da Densidade Aparente.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 133**, Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 138**, Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 194**, Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 193**, Materiais Betuminosos Líquidos e Sólidos – Determinação da Densidade.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). **ME 262**, Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995). **ME 084**, Peso específico real.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996). **PRO 199**, Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). **EM 367**, Material de Enchimento para Misturas Betuminosas.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). **ES 313**, Pavimentação - concreto betuminoso.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). **PRO 120**, Coleta de Amostras de Agregados.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). **ME 035**, Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). **ME 081**, Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). **ME 083**, Agregados – Análise Granulométrica.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). **ME 163**, Materiais Betuminosos – Determinação da Ductilidade.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). **ME 003**, Material Betuminoso – Determinação da Penetração.

DNER. (1994). Determinação da Massa Aparente *in situ* com Emprego do Frasco de Areia –**ME 092/94**. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Normas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ, v.1, 5p.

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **Manual de Pavimentação**. Ministério dos Transportes, Brasil, 1996.

Emlin, B. I.; Pogrebnyak, A. I.; Vodin, I. I.; Matyashenko, N. K.; Belan, V. D.; Sarankin, V. A.; Chupakhin, Y. M.; Shaposhnik, I. I.; Shchedrovitskii, V. Y.. **Silicomanganese smelting**. Otkrytiya Izobret, 1986.

Faria, G. L.. **Estudo da intensidade de crepitação de minérios granulados de manganês do Brasil**. Dissertação de mestrado, REDEMAT - Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

Faxina, A.L.. **Estudo de viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha**. 2006. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no estado de minas gerais, prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade**. Relatório técnico. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento, Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais, 2010.

Fernandes, D. P. **Estudo de estabilização química, geomecânica a ambiental da escória de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastros de ferroviária**,

2010. 142 f. Dissertação de mestrado, NUGEO - Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

Fernandes, G.. **Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 253p, 2005.

Geiseler, J.; Drissen, P.; Kuehn, M.; Schrey, H.. **Liquid slag treatment guarantees high product quality of steel slags**. Iron and Steel Slags - Properties and utilization – Reports, 1999.

Geyer, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto, 2001**. 187 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

Gonçalves, E.; Serfaty, A. **Perfil analítico do manganês**. DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral, Boletim n 37, Brasília, 1976.

Gumiere, A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD em Materiais de Construção Civil**. Proposta de Tese. Programa de PósGraduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

Harmelink, D; Shuler, S; Aschenbrener, T.. Top-down cracking in asphalt pavements: causes, effects and cures. **Journal of Transportation Engineering**, v.134, n., p. 1-6, 2008.

Hunt, L; Boyle, G. E.. **Steel slag in hot mix asphalt concrete**. State Research Project 511, Final Report, Salem, Oregon, 2000.

IBRAM- Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral**

brasileira 2015. IBRAM. Brasília, 2015.

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia. **Escórias siderúrgicas: novas tendências. 9ª RAPU - Reunião Anual de Pavimentação Urbana.** 1998. Rio de Janeiro.

IBS- Instituto Brasileiro de Siderurgia. **2º Relatório Técnico de Acompanhamento – Ensaio de Caracterização do Agregado Siderúrgico.** 2004. Rio de Janeiro.

Jackson, N.M.; Czor, L.J.. 100-mm-diameter mold used with Superpave gyratory compactor. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2003.

John, V. M. **Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos.** In: Workshop sobre Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil, São Paulo, 1996.

Kabir, M. S.; Icenogle, P.; King, W.; Abadie, C.. Performance of Superpave Projects in Louisiana. **Transportation Research Records: Journal of the Transportation Research Board.** Washington, n. 2207, p. 16 – 24, 2011.

Kandhal, P.S.; Hoffman, G.L.. Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 1583, 1998.

Kruger, P. V. **Relatório Técnico 60 - Perfil de Ferroligas.** Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Banco Mundial. BIRD - Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento, 2009.

Leite, A. A. F.; Bajay, S. V.; Gorla, F. D. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria.** Relatório setorial Ferroligas, Brasília, 2010.

Leite, L.F.M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros.** 1999. 266 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

Li, X.; Gibson, N.. Mechanistic Characterization of Aggregate Packing to Assess Gyration Levels During HMA Mix Design. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**. Tampa, v. 80, p. 33 – 64, 2011.

Lima, N.P.; Nascimento, J.F; Val Filho, V.P.C.; Albernaz, C.A.V.. **Pavimentos de alto desempenho estrutural executados como escória de aciaria**. 10ª Reunião Anual de Pavimentação, Uberlândia, Minas Gerais, 2000.

Lúcio, A.; Mines, C.R.C; Castro, L.F.A.; Figueira, R.M.; Sampaio, R.S.; Silveira, R.C.. **Metalurgia dos Ferro-Ligas**, v.I, Belo Horizonte: Editora UFMG, 1980.

Machado, A. T.. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000, 153 f.

Mancio, M.. **Caracterização e avaliação das escórias de aciaria elétrica**, 2001. 141 f. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

Marques, G.L.O.. **“Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica**, 2004. 461 f. **Efeito de Compactação por Impacto e iratória”**. Tese DSc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

Masuero, A.B.; Vilela, A.C.; Molin, D.. **Emprego de Escórias de Aciaria Elétrica como Adição a Concretos**. In: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, 2000. Anais em CD-ROM. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo, 2000.

Medina, J. de; Motta, L. M. G. da. (2005). *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2 ed. 380p.

Medina, J.. **Mecânica dos Pavimentos**. Editora UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 1997, 380p.
Motta, L. M. G.. **Princípios de Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas**. Tradução Comentada, IBP – Instituto Brasileiro do Petróleo, 2000.

Motz, H.; Geiseler, J.. **The steel slags - characteristics, properties and quality assurance, Iron and Steel Slags - Properties and utilization – Reports**, 1998.

Moura, W. A.. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 207f, 2000.

Nascimento, L.A.H.. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação de mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 204f, 2008.

National Cooperative Highway Research Program - **NCHRP 2011 Summary of Progress**. Washington, 2011. Disponível em: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_Annual2011.pdf.> Acesso em: 25 jun. 2017.

Nikolaev, V. I.. **Selection of optimum slag basicity in ferromanganese production**. Steel in USSR, 1974. n. 4.

Nóbrega, L. M. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas utilizando escória de ferroliga de manganês como agregado**. Tese de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2007.

Noureldin, A. S.; McDaniel, R. S. Evaluation of surface mixture of steel slag and asphalt. **Transportation Research Record**, 1989.

Olsen, S. E.; Tangstad, M.. **Silicomanganese production - process understanding**. Dep. of Materials Technology, Norwegian University of Science and Technology; N-7491

Trondheim, Norway, 2004.

Olsen, S. E.; Tangstad, M.; Lindstad, T.. **Production of ferromanganese alloys in the submerged arc furnace.** Trondheim, Norway, 2007.

Parente, E.B.; et al.. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção de rodovia na região metropolitana de Fortaleza.** XVII Congresso De Pesquisa E Ensino Em Transporte, ANPET, v. I, p.215 – 222. 2003.

Peterson, L. et al. Superpave laboratory compaction versus field compaction. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,** Washinston, p 201-208, 2003.

Pinto, S. (1991). **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos.** Tese de Doutorado, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Pinto, S., Preussler, E.S., (2002), **Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis.** 2.ed. Rio de Janeiro, Copiarte.

Pinto, S.. **Materiais Betuminosos – Conceituação, especificação e utilização – Edição Revista Ampliada,** Departamento de Engenharia de Fortificação e Construção – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

PTM – Pennsylvania Testing Method 130 (1978). **Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria, Adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, DMA-1/DER-MG/92.**

Ramos, F. M. **Estudo de caso: gestão de resíduos e coprodutos.** In: Segundo workshop de sustentabilidade do setor siderúrgico brasileiro. Anais. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2008. p. 1 – 50.

Reis, E. L. **Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico carbonatado da RDM-Unidade Morro da Mina**, 2005. 124 f. Dissertação mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

Rohde, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos**, 2002. 101 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

Sahay, J. S.; Nagpal, O. P.; Prasad, S.. **Waste management of steel slag**. In: Steel times international, 2000.

Sebaaly P.E.; Hand A.J.T.; McNamara W.M.; Weitzel D.; Epps J.A.. **Field and laboratory performance of Superpave mixtures in Nevada**, Transportation Research Record, 2004.

Senço, W. **Pavimentação**. Escola Politécnica de São Paulo, v. 1 e 2. 2ª edição. São Paulo. 1997.

Silva, E.A.. **Uso de escórias de aciaria tratadas com emulsiones catiônicas em varias pavimentaciones**. In: 6º Congresso Ibero-Latino Americano Del Asfalto, 2001, Santiago, Tomo I, p. 01-18.

Silva, E.A.; Mendonça, R.L.. Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento, **Revista Engenharia Ciência e Tecnologia**, Vitória, v. 4, n. 2, p 7-20, 2001.

Silva, G. *et al.*. **Escórias Siderúrgicas-Material de Múltiplas Aplicações**. DNER/IPR/Divisão de Pesquisas. 1988.

Silva, L. F. M.. **Fundamentos Teóricos-Experimentais da Mecânica dos Pavimentos Ferroviários e Esboço de um Sistema de Gerência Aplicado à Manutenção de Via Permanente**, 2002. 240 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro,

COPPE, Rio de Janeiro, 2002.

Silva, R. G. O. da. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro**, 2010. 132 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

Souza, G. M.. **Estudo experimental de escórias de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. Dissertação de mestrado. NUGEO - Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

Tangstad, M. **The high carbon ferromanganese process – Coke Bed Relations**. Metallurgist Institutt. Trondheim, 1996.

Valverde, F. M. **Agregados para construção civil, 2001**. Disponível em: <www.dnrm.gov.br/dnrm_legis/Balanço01/pdf/agregados.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2017.

Vasconcelos, K.L.. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Ceará, Fortaleza, 2004.

Vavrik, W.R.; Fries, R.J.; Carpenter, S.H.. Effect of flat and elongated coarse aggregate on characteristics of gyratory compacted samples. **Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board**, Washington, n. 1681, p. 28-36, 1999.

Watson, D.E. et al. Verification os Superpave Number of Design Gyration Compaction Levels for Georgia. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, n.2058, p. 75-82, 2008.

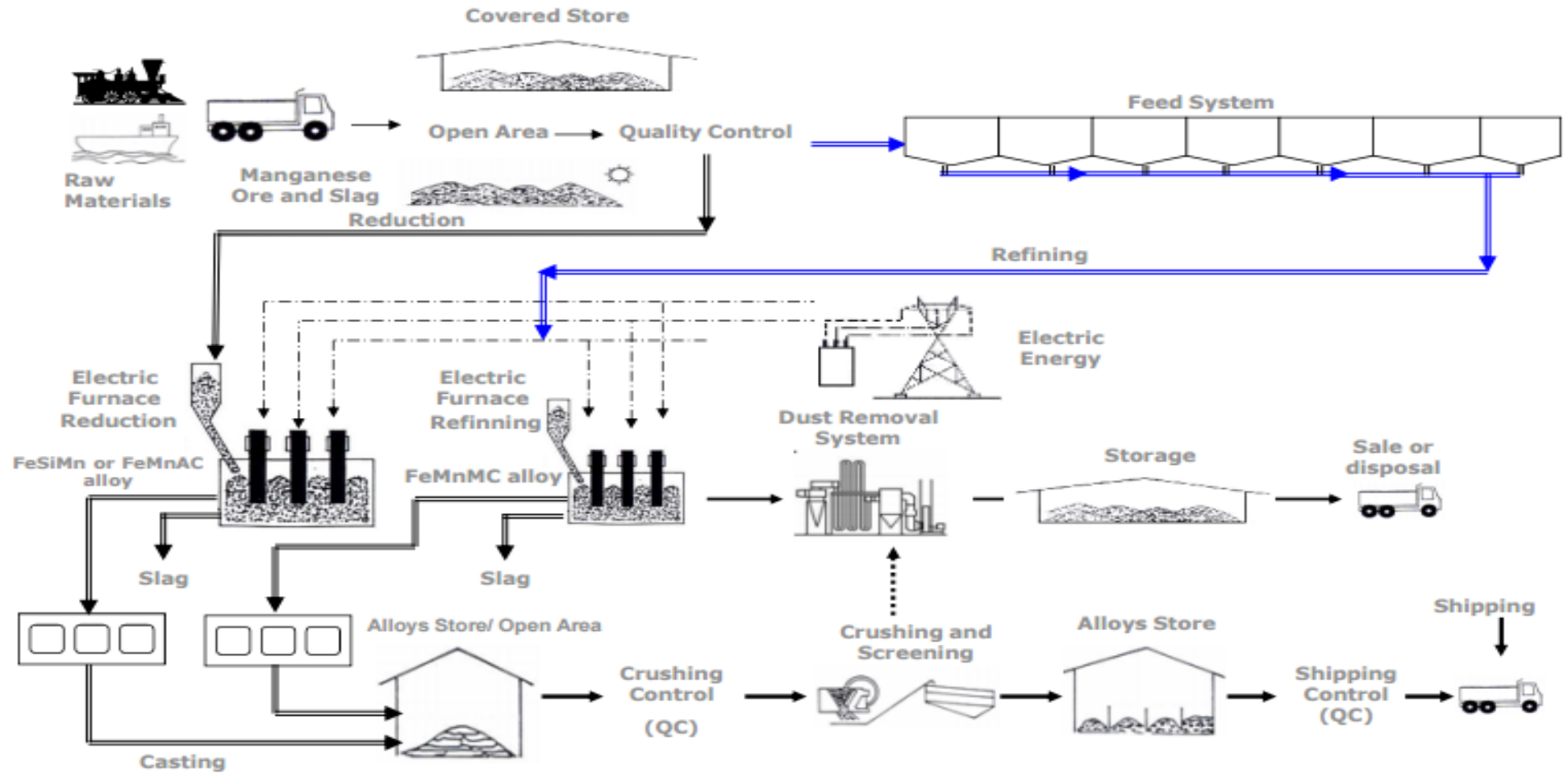
Wesseling, D. H. **Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais**, 2005. 143 f. Dissertação de

Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7133/000539620.pdf?sequence>> Acesso em: 01 jul. 2017.

ANEXO I

FLUXOGRAMA DA PLANTA

PLANT FLOWCHART



ANEXO II

ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\cp1310R.dat

DADOS DO ENSAIO

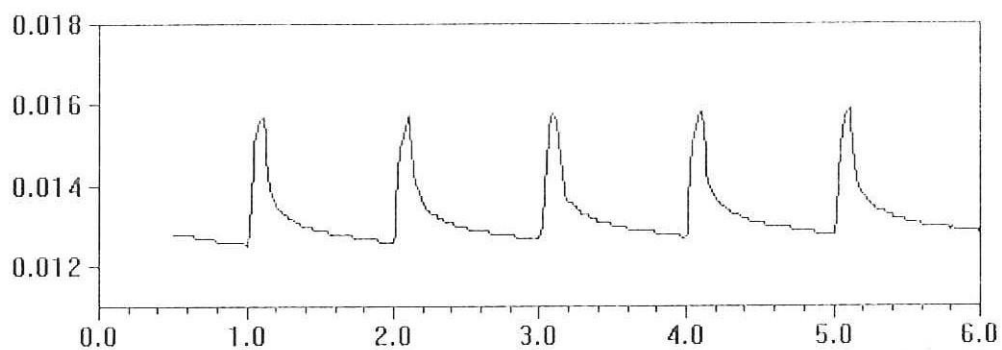
Amostra: 1	Origem: UFOP	C.P. No : 1310
Rodovia:	Trecho:	Est/Km: -
Operador: Vitor	Interess.: Ana Mara	Data: 11/05/2017
Diâmetro C.P.(cm): 10	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 6.62
Observações: Convencional - Teor ótimo 4,3% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	666.76	0.005152	10899
CICLO 2 -->	664.27	0.005656	9891
CICLO 3 -->	663.79	0.005585	10009

Valor Médio: 10266 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\cp1311.dat

DADOS DO ENSAIO

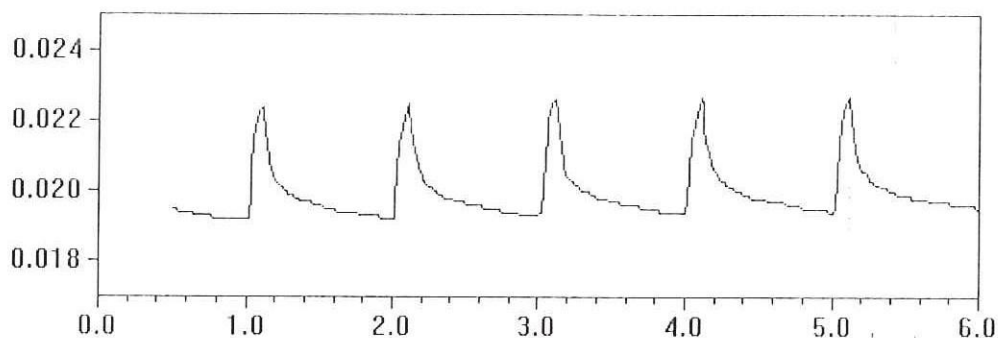
Amostra: 2	Origem: UFOP	C.P. No.: 1311
Rodovia:	Trecho:	Est/Km: -
Operador: Vitor	Interess.: Ana Mara	Data: 11/05/2017
Diâmetro C.P.(cm): 10	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 6.72
Observações: Convencional - Teor ótimo 4,3% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	696.58	0.005597	10324
CICLO 2 -->	696.10	0.005838	9892
CICLO 3 -->	693.42	0.005808	9905

Valor Médio: 10040 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\cp1312.dat

DADOS DO ENSAIO

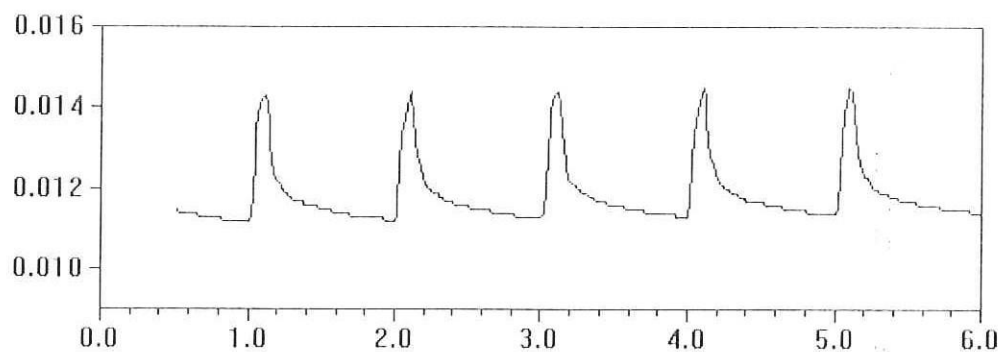
Amostra: 3	Origem: UFOP	C.P. No.: 1312
Rodovia:	Trecho:	Est/Km: -
Operador: Vitor	Interess.: Ana Mara	Data: 11/05/2017
Diâmetro C.P.(cm): 10	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 6.67
Observações: Convencional - Teor ótimo 4,3% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	693.40	0.005389	10755
CICLO 2 -->	698.06	0.005496	10616
CICLO 3 -->	698.09	0.005545	10522

Valor Médio: 10631 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\cp1300R.dat

DADOS DO ENSAIO

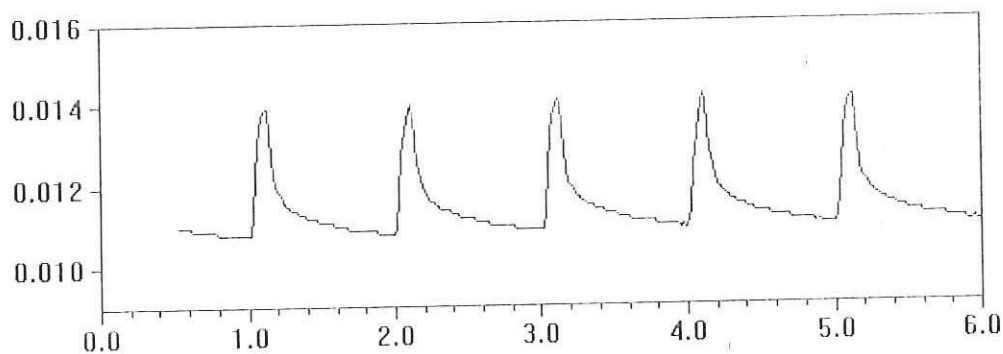
Amostra: 1	Origem: UFOP	C.P. No: 1300
Rodovia:	Trecho:	Est/Km: -
Operador: Vitor	Interess.: Ana Mara	Data: 11/05/2017
Diâmetro C.P.(cm): 10	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 6.35
Observações: Escória 1 - Teor ótimo 4,8% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	633.39	0.005399	10300
CICLO 2 -->	634.24	0.005696	9775
CICLO 3 -->	633.97	0.005607	9927

Valor Médio: 10001 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\cp1301.dat

DADOS DO ENSAIO

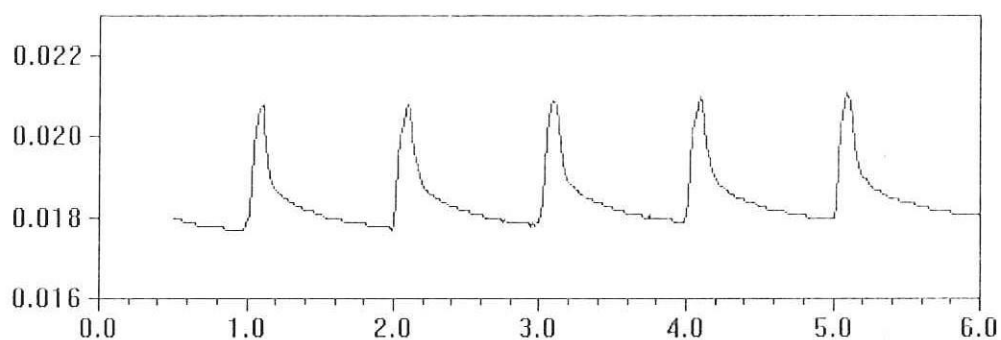
Amostra: 2	Origem: UFOP	C.P. No.: 1301
Rodovia:	Trecho:	Est/Km: -
Operador: Vitor	Interess.: Ana Mara	Data: 11/05/2017
Diâmetro C.P.(cm): 10	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 6 50
Observações: Escória 1 - Teor ótimo 4,8% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	635.09	0.005493	9916
CICLO 2 -->	632.79	0.005258	10321
CICLO 3 -->	632.98	0.005398	10057

Valor Médio: 10098 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\CP1302.dat

DADOS DO ENSAIO

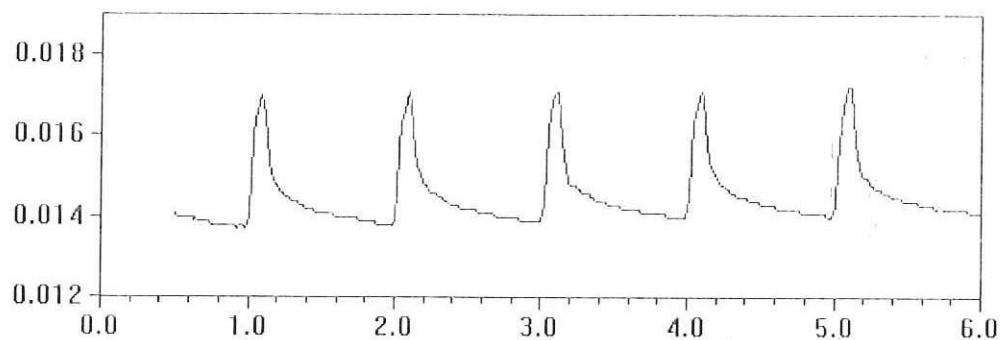
Amostra: 3	Origem: UFOP	C P No. 1302
Rodovia:	Trecho:	Est/Km: -
Operador: Vitor	Interess.: Ana Mara	Data: 11/05/2017
Diâmetro C.P.(cm): 10	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 6.41
Observações: Escória 1 - Teor ótimo 4,8% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	633.17	0.005287	10416
CICLO 2 -->	638.40	0.005443	10201
CICLO 3 -->	634.48	0.005915	9330

Valor Médio: 9982 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\cp1266.dat

DADOS DO ENSAIO

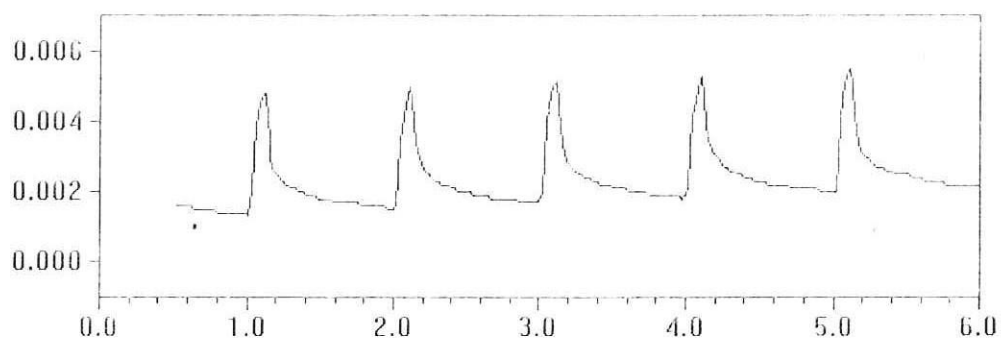
Amostra: 1	Origem: UFOP	C.P. No.: 1266
Rodovia:	Trecho:	Est/Km: -
Operador: Vitor	Interess.: Ana Mara	Data: 10/05/2017
Diâmetro C.P.(cm): 10	Temperatura: 25 °C	Altura C.P (cm): 6.52
Observações: Escória 2 - Teor ótimo 4,5% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	636.47	0.005998	9074
CICLO 2 -->	637.01	0.006033	9028
CICLO 3 -->	635.00	0.005743	9454

Valor Médio: 9185 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\cp1267.dat

DADOS DO ENSAIO

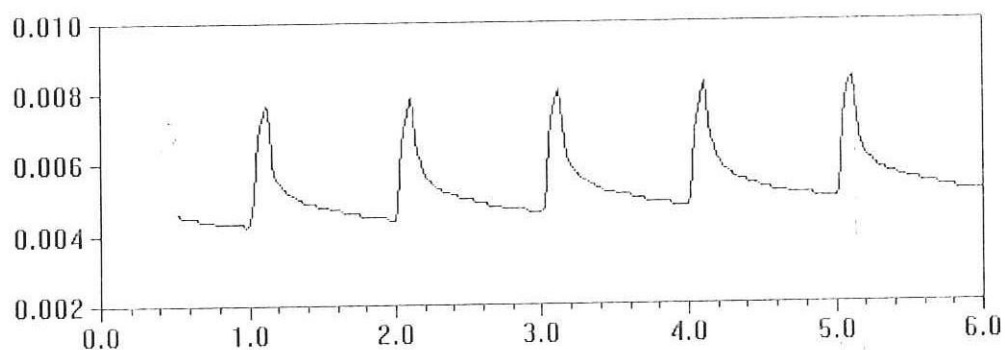
Amostra: 2	Origem: UFOP	C.P. No: 1267
Rodovia:	Trecho:	Est/Km: -
Operador: Vitor	Interess.: Ana Mara	Data: 10/05/2017
Diâmetro C.P.(cm): 10	Temperatura: 25 °C	Altura C.P.(cm): 6.46
Observações: Escória 2 - Teor ótimo 4,5% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	632.67	0.005607	9738
CICLO 2 -->	634.33	0.005719	9572
CICLO 3 -->	635.03	0.005769	9499

Valor Médio: 9603 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



RELATÓRIO DE ENSAIO DE MÓDULO - COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\cp1292R.dat

DADOS DO ENSAIO

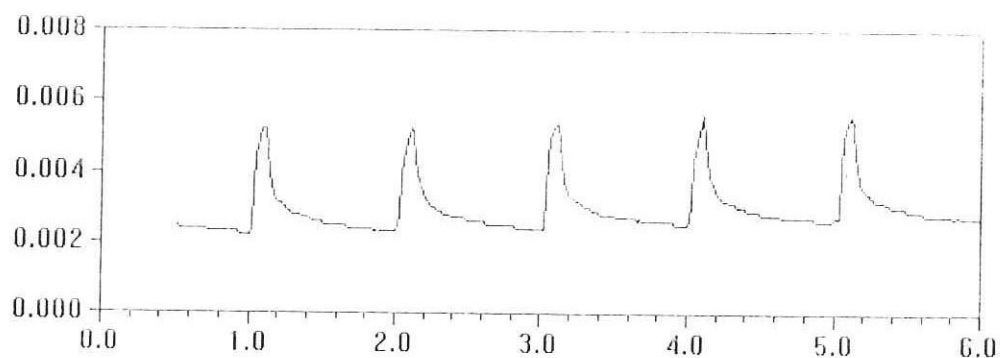
Amostra: 3	Origem: UFOP	C.P. No.: 1292
Rodovia:	Trecho:	Est/Km: -
Operador: Vitor	Interess.: Ana Mara	Data: 10/05/2017
Diametro C.P. (cm): 10	Temperatura: 25 °C	Altura C.P. (cm): 6.48
Observações: Escória 2 - Teor ótimo 4,5% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

	Força (Kgf)	Deslocamento Resiliente(mm)	Módulo Resiliente (MPa)
CICLO 1 -->	664.38	0.005017	11394
CICLO 2 -->	667.40	0.005317	10799
CICLO 3 -->	667.82	0.005521	10407

Valor Médio: 10867 MPa

Tempo(seg) x Deslocamento Médio (mm)



ANEXO III

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA

RELATÓRIO DE ENSAIO DE FADIGA

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\FAD1318.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 09	Temperatura: 25 °C	Operador: Vitor
Módulo resiliente médio: 10312 MPa	Interess.: Ana Mara	Est/Km: -
Tensão de tração estática Máxima: 2.31 MPa		Data: 15/05/2017
Origem: UFOP	Rodovia: -	Trecho: -

Observações: Convencional - Teor ótimo 4,3% - Faixa B

TABELA DE RESULTADOS

Num. C.P.	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	N.T. (%)	Força (Kgf)	D.E.R.	Dif.Tensões (MPa)	Número de Aplicações
1313	6.55	10.00	40	969.41	0.0000896	3.700	1205
1314	6.61	10.00	35	856.00	0.0000784	3.230	2027
1315	6.65	10.00	30	738.15	0.0000672	2.770	9932
1316	6.66	10.00	25	616.05	0.0000560	2.310	8752
1317	6.62	10.00	20	489.88	0.0000448	1.850	31076
1318	6.64	10.00	15	368.52	0.0000336	1.390	68188

RELATÓRIO DE ENSAIO DE FADIGA

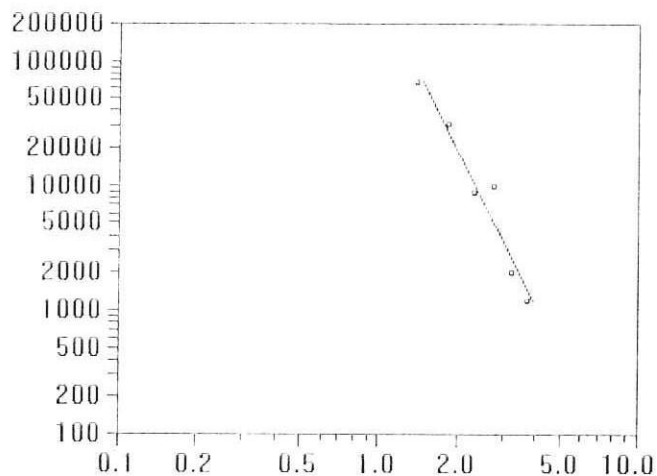
Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\FAD1318.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 09	Temperatura: 25 °C	Operador: Vitor
Módulo resiliente medio: 10312 MPa	Interess: Ana Mara	Est/Km: -
Tensão de tração estática Máxima: 2.31 MPa		Data: 15/05/2017
Origem: UFOP	Rodovia: -	Trecho: -
Observações: Convencional - Teor ótimo 4,3% - Faixa B		

RESULTADOS

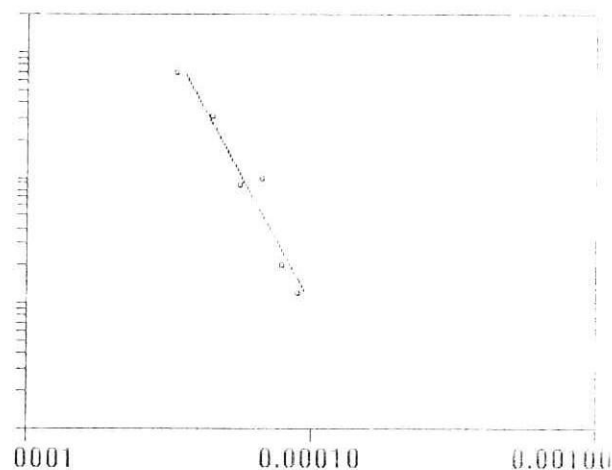
Diferença de Tensões x Vida de Fadiga



$$Y = 325521.7 X^{-4.1080}$$

$$R^2 = 0.9403$$

Def. Especifica Resiliente x Vida de Fadiga



$$Y = 4.0E-014 X^{-4.0953}$$

$$R^2 = 0.9398$$

RELATÓRIO DE ENSAIO DE FADIGA

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\FAD1308.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 09	Temperatura: 25 °C	Operador: Vitor
Módulo resiliente médio: 10027 MPa	Interess.: Ana Mara	Est/Km -
Tensão de tração estática Máxima: 2.31 MPa		Data: 16/05/2017
Origem: UFOP	Rodovia: -	Trecho: -
Observações: Escoria 1 - Teor ótimo 4,8% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

Num. C.P.	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	N.T. (%)	Força (Kgf)	D.E.R.	Dif.Tensões (MPa)	Número de Aplicações
1303	6.46	10.00	40	956.09	0.0000922	3.700	552
1304	6.39	10.00	35	827.51	0.0000806	3.230	1590
1305	6.36	10.00	30	705.96	0.0000691	2.770	2093
1306	6.34	10.00	25	586.45	0.0000576	2.310	13734
1307	6.38	10.00	20	472.12	0.0000461	1.850	14908
1308	6.41	10.00	15	355.76	0.0000346	1.390	75204

RELATÓRIO DE ENSAIO DE FADIGA

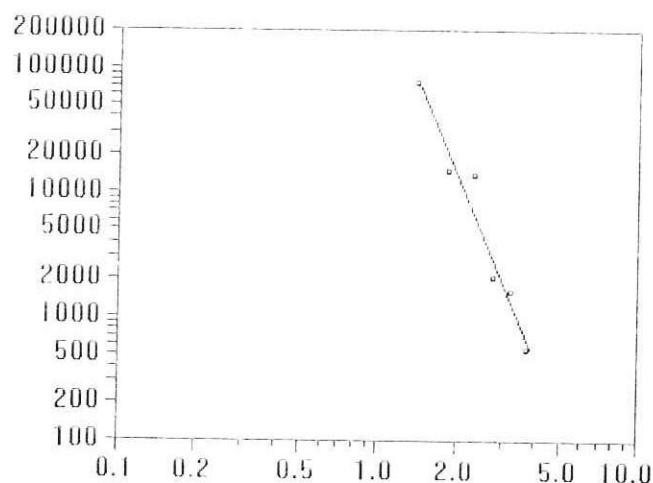
Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\FAD1308.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 09	Temperatura: 25 °C	Operador: Vitor
Módulo resiliente medio: 10027 MPa	Interess: Ana Mara	Est/Km: -
Tensão de tração estática Máxima: 2.31 MPa		Data: 16/05/2017
Origem: UFOP	Rodovia: -	Trecho: -
Observações: Escória 1 - Teor ótimo 4.8% - Faixa B		

RESULTADOS

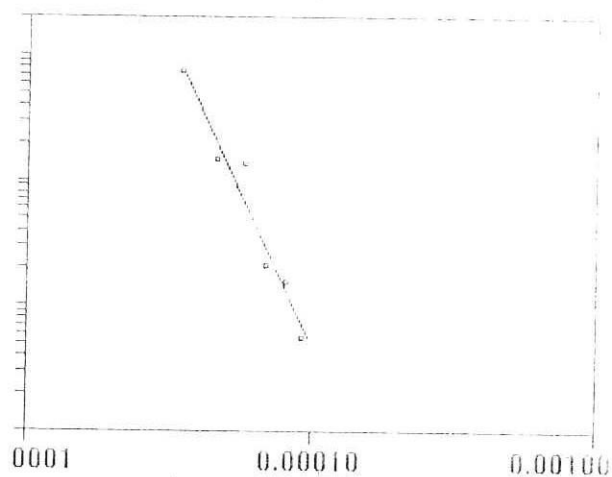
Diferença de Tensões x Vida de Fadiga



$$Y = 397957.2 X^{-4.8594}$$

$$R^2 = 0.9541$$

Def. Específica Resiliente x Vida de Fadiga



$$Y = 2.0E-017 X^{-4.8450}$$

$$R^2 = 0.9536$$

RELATÓRIO DE ENSAIO DE FADIGA

Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\FAD1299.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 10	Temperatura: 25 °C	Operador: Vitor
Módulo resiliente médio: 9885 MPa	Interess.: Ana Mara	Est/Km: -
Tensão de tração estática Máxima: 3.23 MPa		Data: 18/05/2017
Origem: UFOP	Rodovia: -	Trecho: -
Observações: Escória 2 - Teor ótimo 4.5% - Faixa B		

TABELA DE RESULTADOS

Num. C.P	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	N.T. (%)	Força (Kgf)	D.E.R.	Dif.Tensões (MPa)	Número de Aplicações
1294	6.52	10.00	35	1180.62	0.0001144	4.520	232
1293	6.54	10.00	30	1015.07	0.0000980	3.880	545
1295	6.62	10.00	25	856.23	0.0000817	3.230	882
1296	6.59	10.00	20	681.88	0.0000654	2.580	3170
1298	6.47	10.00	15	502.10	0.0000490	1.940	17130
1299	6.53	10.00	10	337.84	0.0000327	1.290	149217

RELATÓRIO DE ENSAIO DE FADIGA

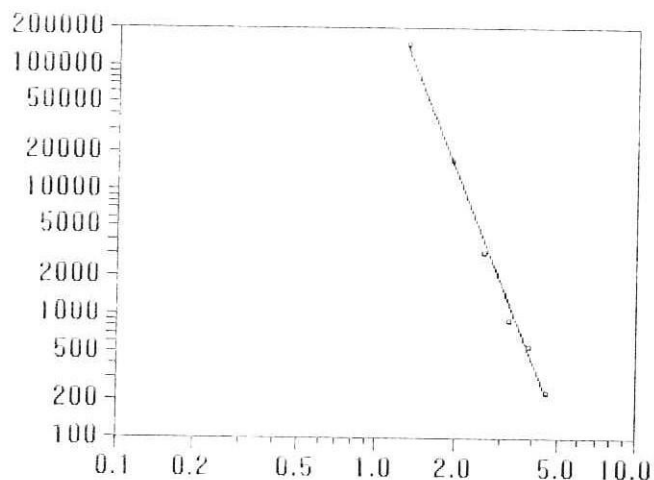
Nome do Arquivo: C:\dados\Ana Mara\FAD1299.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 10	Temperatura: 25 °C	Operador: Vitor
Módulo resiliente medio: 9885 MPa	Interess: Ana Mara	Est/Km: -
Tensão de tração estática Máxima: 3.23 MPa		Data: 18/05/2017
Origem: UFOP	Rodovia: -	Trecho: -
Observações: Escória 2 - Teor ótimo 4,5% - Faixa B		

RESULTADOS

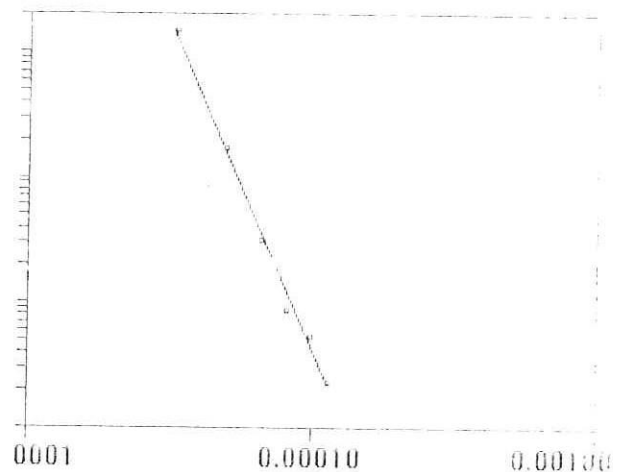
Diferença de Tensões x Vida de Fadiga



$$Y = 506567.2 X^{-5.1778}$$

$$R^2 = 0.9942$$

Def. Específica Resiliente x Vida de Fadiga



$$Y = 7.6E-05 X^{-5.1828}$$

$$R^2 = 0.9943$$